

Martin Weber

**Theoretische und experimentelle Untersuchung des
Tragverhaltens von Glasauflagervarianten bei Stahl-
Aufsatzfassaden unter dem primären Aspekt der
Verformungsanalyse**

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik

Wurzen, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Harald Schulz

Vorgelegte Arbeit wurde eingereicht am: 15.05.2009

Bibliographische Beschreibung

Weber, Martin:

Theoretische und experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens von
Glasauflagervarianten bei Stahl-Aufsatzfassaden unter dem primären Aspekt der
Verformungsanalyse. - 2009. - 112S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik,
Diplomarbeit, 2009.

Erklärung zur selbständigen Anfertigung dieser Arbeit

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der
angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Wurzen, 15.05.09



Martin Weber

Referat

Aufgrund architektonischer und bauphysikalischer Anforderungen nehmen Größe und Gewicht von Isolierverglasungen bei Pfosten-Riegel-Fassaden immer mehr zu. Auch in Zukunft wird sich dieser Trend wegen immer strengeren Anforderungen hinsichtlich der Energieeinsparung fortsetzen. Obwohl primär durch das Gewicht der Isolierglaseinheiten belastet, wurde der Glasauflegerkonstruktion bisher nur wenig Beachtung geschenkt.

In dieser Diplomarbeit werden deshalb Überlegungen zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Glasauflägern angestellt. Weiterhin wird eine bestehende Glasauflegerkonstruktion theoretisch und mit Hilfe von Bauteilversuchen hinsichtlich ihres Tragverhaltens untersucht und schließlich eine FE-Simulation auf Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen erstellt. Hinweise zur Verbesserung einer bestehenden Konstruktion werden gegeben. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen zu weiteren Untersuchungen anregen und können auch als Grundlage für diese dienen.

Abstract

As a result of construction physics and architecture requirements dimension and weight of insulating glass in curtain wall façades increase. Due to even more demanding directives concerning energy saving this tendency will continue in the future. Though glass support primarily bears the weight of the insulating glass units it has not yet been in the focus of research.

Therefore in this diploma thesis facts for the evaluation of the serviceability of glass support are considered. Furthermore an existing glass support construction is analysed in theory as well as in practice by running load bearing tests. Based on previous studies a FEA is developed. Advice for improvement of an existing construction is given. The technical expertise gained in this work shall encourage further analysis and provides a basis for these, too.

Danksagung

Diese Stelle möchte ich gern dazu nutzen, mich bei einigen Personen und Firmen zu bedanken, ohne welche diese Arbeit nicht hätte entstehen können:

Meinem Erstkorrektor Herrn *Prof. Dr.-Ing. T. Laufs* möchte ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse, die nützlichen Hinweise und die konstruktive Kritik danken.

Herrn *Dr.-Ing. H. Schulz* möchte ich für die interessante Aufgabenstellung, die Übernahme der Zweitkorrektur, die vielen Anregungen sowie für seine ständige Diskussionsbereitschaft danken, mit welcher er meine Arbeit stets vorangebracht hat.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn *Dipl.-Ing. H. Hobler* für seine Unterstützung, die Einweisung im Umgang mit den Messmitteln und die vielen nützlichen Hinweise bei der Versuchsdurchführung. Ohne diese Hilfestellung wäre diese Arbeit in der jetzigen Form nicht möglich gewesen.

Bei der Firma *esco* möchte ich mich für die Bereitstellung der Versuchsmaterialien und die Überlassung der Versuchseinrichtung bedanken. Ebenfalls danke ich Herrn *U. Gramling* von der Firma *esco* für die Erstellung der 3D-Zeichnungen.

Herrn *Heyder* von der Firma *hpl structural* sowie Herrn *Perin* von der Firma *HSH* möchte ich für die kostenfreie Bereitstellung der Software *Straus7* danken. Herr *S. Rücker* und Herr *F. Döbbel* vom Ingenieurbüro *GSK* in Dresden haben mich bei der numerischen Umsetzung unterstützt. Vielen Dank auch dafür!

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinem Vater, Herrn *Andreas Weber*, für seine tatkräftige Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und meiner Frau *Vivien* für die Korrektur des Manuskripts herzlich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	12
1.1	EINLEITUNG	12
1.2	ANLASS, PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	15
1.3	STAND DER TECHNIK	17
1.4	AUFBAU DER DIPLOMARBEIT UND ABGRENZUNG	18
1.4.1	<i>Aufbau</i>	18
1.4.2	<i>Abgrenzung</i>	18
1.5	BEGRIFFE UND BEZEICHNUNGEN	19
2	DAS GLASAUFLAGER BEI PFOSTEN-RIEGEL-FASSADEN	26
2.1	AUFBAU EINES GLASAUFLAGERS	26
2.1.1	<i>Allgemeiner Aufbau</i>	26
2.1.2	<i>Glasauflager der Stahl-Aufsatzkonstruktion Ferro-Wictec 55-1 E</i>	28
2.2	TRAGVERHALTEN EINER AUSGEWÄHLTEN KONSTRUKTION	32
2.2.1	<i>Strukturelles Tragverhalten</i>	32
2.2.2	<i>Materialgesetze</i>	48
2.3	GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT VON GLASAUFLAGERN	51
2.4	ZUSAMMENFASSUNG	55
3	VERSUCHSBESTIMMTE VERFORMUNG DER GLASAUFLAGER	57
3.1	EINFÜHRUNG UND STRATEGIE	57
3.2	ÜBERSICHT ÜBER DAS VERSUCHSPROGRAMM	58
3.3	BESCHREIBUNG DER PROBEKÖRPER	60
3.4	VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG	64
3.4.1	<i>Serie B und Serie C</i>	64
3.4.2	<i>Kalibriermessungen (Serie A)</i>	67
3.4.3	<i>Zur Wahl des Versuchsaufbaus</i>	68
4	DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG	69
4.1	ALLGEMEINES ZUR AUSWERTUNG	69
4.2	AUSWERTUNG DER KALIBRIERMESSUNGEN (SERIE A)	71
4.2.1	<i>Ziel der Versuche</i>	71
4.2.2	<i>Darstellung der Versuchsergebnisse</i>	71
4.3	AUSWERTUNG DER SERIEN B UND C	73
4.3.1	<i>Ziel der Versuche und Übersicht über die Ergebnisse</i>	73
4.3.2	<i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Füllungsdicke</i>	76
4.3.3	<i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit vom Schraubenabstand</i>	77
4.3.4	<i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Profilverdrehung</i>	81
4.4	ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE	82
5	UNTERSUCHUNG DER GLASAUFLAGER MIT DER FINITE-ELEMENTE-METHODE	83
5.1	ALLGEMEINES	83
5.2	MODELLBILDUNG	83
5.2.1	<i>Materialmodelle</i>	83
5.2.2	<i>Modellierung der Schraube</i>	85
5.2.3	<i>Modellierung Grundprofil</i>	85
5.2.4	<i>Modellierung Glasauflager</i>	86
5.2.5	<i>Modellierung des Kontaktproblems im Schraubkanal</i>	86

1 Einführung	6
5.2.6 <i>Einstellung des Solvers</i>	87
5.2.7 <i>Zusammenfassung der Modelleigenschaften</i>	87
5.2.8 <i>Grenzen einer Berechnung mit finiten Elementen</i>	89
5.3 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE	90
5.3.1 <i>Übersicht über die Ergebnisse</i>	90
5.3.2 <i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Füllungsdicke</i>	94
5.3.3 <i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit vom Schraubenabstand</i>	94
5.3.4 <i>Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Profilverdrehung</i>	97
5.4 ZUSAMMENFASSUNG	99
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	100
6.1 TRAGMODELL UND GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT	100
6.2 VERSUCHSBESTIMMTE TRAGFÄHIGKEIT DER GLASAUFLAGER	103
6.3 VERGLEICH MIT DEN BESTEHENDEN VERARBEITUNGSRICHTLINIEN	104
6.4 OPTIMIERUNGSVORSCHLÄGE FÜR DIE BESTEHENDE KONSTRUKTION	106
6.5 AUSBLICK UND SCHLUSS	107
7 LITERATURVERZEICHNIS	108
ANHANG	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: (von oben nach unten) Mittelalterliche Fassade, ©Stephen McClusky; Natursteinfassade, ©Thermos; Glasfassade, ©FB Weber; Medienfassade in Glasfassade integriert, ©FB Weber.	12
Abbildung 1-2: Behaglichkeitsfeld nach [15].	13
Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau einer Pfosten-Riegel-Fassade [12].	15
Abbildung 1-4: Unter Glasgewicht verformtes Glasauflager.	16
Abbildung 1-5: Koordinatensystem und Bezugspunkte bei Stäben [25].	19
Abbildung 1-6: Wirkungsrichtungen und Angriffspunkte der Lastgrößen.	20
Abbildung 1-7: Positive Wirkrichtung der Schnittgrößen.	21
Abbildung 1-8: Definition der Verschiebungsgrößen.	22
Abbildung 1-9: Aufbau Randverbund.	24
Abbildung 2-1: Beispiele für die Anordnung von Glasauflagern, entnommen aus [12] und [17].	26
Abbildung 2-2: Beispiele für konstruktive Ausbildung. a) Schüco FW 50+; b) Wicona Wictec 50; c) esco Ferro-Wictec 55-1 E; d) Jansen VISS Basic TV; e) Forster thermfix light.	27
Abbildung 2-3: Geometrie Grundprofil Ferro-Wictec 55-1 E.	28
Abbildung 2-4: Isometrie Glasauflager.	28
Abbildung 2-5: Definitionen am Glasauflager.	29
Abbildung 2-6: Grundprofil geschweißt mit geschraubtem Glasauflager (zwei Schrauben je Glasauflager).	30
Abbildung 2-7: Grundprofil geschweißt, Glasauflager mit Lastabtragungsplatte befestigt.	31
Abbildung 2-8: Verformungsmöglichkeiten eines Glasauflagers. Bild a) Ausgangszustand, b) Verformung des Riegels, c) Verdrehung des Riegels, d) Verdrehung Grundprofil, e) Biegung Schraubkanal, f) Biegung der Schraube.	32
Abbildung 2-9: Schematische Lastabtragung am Glasauflager unter einer ausgewählten Belastungssituation.	34
Abbildung 2-10: Schraubkanal als Balkenschar (oben) und mit erzwungenem Ebenbleiben des Querschnittes (unten).	35
Abbildung 2-11: Statisches System Riegel.	37
Abbildung 2-12: Verformung am Glasauflager für Riegel aus Stahl und Aluminium.	38
Abbildung 2-13: Verformung am Glasauflager für Riegel aus Holz.	39
Abbildung 2-14: Riegelverdrehung am Glasauflager in [mrad].	39

Abbildung 2-15: Erforderliche Riegelträgheitsmomente I_z unter Berücksichtigung einer Verformung von $l/500$, maximal 3mm.	40
Abbildung 2-16: Definition I_G .	41
Abbildung 2-17: Statisches System und Verdrehung des Pfostens.	42
Abbildung 2-18: Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung für Aluminium und Stahl.	43
Abbildung 2-19: Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung für Holz.	43
Abbildung 2-20: Pfostenverdrehung in Abhängigkeit der Riegellage.	44
Abbildung 2-21: Vergleich von Querschnittswerten.	45
Abbildung 2-22: Zusammengesetzte Verformung.	46
Abbildung 2-23: Spannungs-Dehnungskurven für nichtrostenden Stahl und Baustahl [13].	48
Abbildung 2-24: Definition Sekantenmodul am Beispiel einer ausgewählten Spannungs-Dehnungskennlinie.	49
Abbildung 2-25: Belastung des Randverbunds bei Scheibenversatz (links) und Windsog (rechts) [26].	51
Abbildung 2-26: Definition des Gebrauchstauglichkeitskriteriums für Aufsatzfassadensystem Ferro-Wictec 55-1 E.	53
Abbildung 3-1: Abmaße Probekörper (Darstellungen ohne Dichtungen).	60
Abbildung 3-2: Fertigung der Prüfkörper mit Lehren.	60
Abbildung 3-3: Detail Glasaufleger linke Seite (Darstellung ohne Dichtung).	61
Abbildung 3-4: Linke Seite: Detail Glasauflegerendstück. Rechte Seite: Schnitt durch Glasaufleger.	61
Abbildung 3-5: Prüfkörper ohne (oben rechts) und mit (unten rechts) Dichtung und Glasauflager.	62
Abbildung 3-6: Oben: Verbindung Grundprofil ohne zusätzlichen Schweißpunkt (Serien A und B). Unten: Verbindung Grundprofil mit zusätzlicher Lochschweißung (Serie C).	62
Abbildung 3-7: Aufnahme ohne (links) und mit (rechts) Prüfkörper.	64
Abbildung 3-8: Statisches System der Versuche.	64
Abbildung 3-9: Versuchsaufbau.	65
Abbildung 3-10: Großes Bild: Schnitt durch Glasaufleger; kleine Bilder: Anordnung der Wegaufnehmer links (oben) und rechts (unten).	66
Abbildung 3-11: Vermessung des Schraubkanals.	66
Abbildung 3-12: Glasaufleger mit Glasklotz.	67

Abbildung 3-13: Versuchsaufbau Versuche A7 und A8.	68
Abbildung 4-1: Versuchsaufbau schematisch.	69
Abbildung 4-2: Last-Verformungsverhalten Versuche A2 bis A6.	71
Abbildung 4-3: Kalibrierung der Kraftaufnehmer.	72
Abbildung 4-4: Verformungen am Punkt W1 für die Versuche B1 bis B6 und C1 bis C6.	73
Abbildung 4-5: Übersicht über die Versuchsergebnisse Serie B.	74
Abbildung 4-6: Übersicht über die Versuchsergebnisse Serie C.	75
Abbildung 4-7: Verformungen am Punkt W2 für die Versuche B1 bis B3 und C1 bis C3.	77
Abbildung 4-8: Verformungen am Punkt W2 für die Versuche B4 bis B6 und C4 bis C6.	78
Abbildung 4-9: Bleibende Verformungen am Schraubkanal bei den Versuchen B1 bis B3 und C1 bis C3.	78
Abbildung 4-10: Bleibende Verformungen am Schraubkanal bei den Versuchen B4 bis B6 und C4 bis C6.	78
Abbildung 4-11: Bleibende Verformung am Messpunkt W1 für die Versuche B1 bis B3 und C1 bis C3.	79
Abbildung 4-12: Bleibende Verformung am Messpunkt W1 für die Versuche B4 bis B6 und C4 bis C6.	80
Abbildung 5-1: Spannungs-Dehnungsbeziehung S280.	84
Abbildung 5-2: Spannungs-Dehnungsbeziehung Schraubenwerkstoff.	84
Abbildung 5-3: Freiheitsgrade an einem Beam2-Element.	85
Abbildung 5-4: Definition Quad8-Element.	85
Abbildung 5-5: Glasauflager, isometrische Darstellung mit Innendichtung (Versuch B5).	88
Abbildung 5-6: Finite-Elemente-Modell, Liniendarstellung (Versuch B5).	88
Abbildung 5-7: Finite-Elemente-Modell, gefüllte Darstellung (Versuch B5).	89
Abbildung 5-8: Vergleich der Last-Verformungskurven Serie B. Abszisse: Verformung des Glasauflagers in [mm]. Ordinate: Kraft je Schraube in [N].	89
Abbildung 5-9: Vergleich der Last-Verformungskurven Serie C. Abszisse: Verformung des Glasauflagers in [mm]. Ordinate: Kraft je Schraube in [N].	91
Abbildung 5-10: Simulationsergebnisse Serie B.	92
Abbildung 5-11: Simulationsergebnisse Serie C.	93
Abbildung 5-12: Verformungen DY Simulation C1.	95
Abbildung 5-13: Verformungen DY Simulation C2.	95

Abbildung 5-14: Verformungen DY Simulation C3.	96
Abbildung 5-15: Vertikalverformung Versuch B2, überhöhte Darstellung.	97
Abbildung 5-16: Vergleich der Simulationen B1 und C1 hinsichtlich der Grundprofilverdrehung.	98
Abbildung 6-1: Bestehende Glasauflagerkonstruktion.	106
Abbildung 6-2: Vorgeschlagene Glasauflagerkonstruktion.	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Häufig vorkommende Fassadenarten [32].	13
Tabelle 1-2: Häufig vorkommende Fassadenarten [32] (Fortsetzung).	13
Tabelle 1-3: Schnittgrößen als Resultierende der Spannungen.	21
Tabelle 2-1: Querschnittswerte einiger ausgewählter Querschnitte.	45
Tabelle 2-2: Berechnung der Verformungsanteile.	47
Tabelle 2-3: Gegenüberstellung der Materialeigenschaften.	48
Tabelle 2-4: Konstanten zur Bestimmung des Sekantenmoduls [13].	50
Tabelle 3-1: Konstante und variable Einflussfaktoren.	58
Tabelle 3-2: Übersicht über die Versuche.	59
Tabelle 3-3: Übersicht über die Artikelnummern (aus [16]).	61
Tabelle 4-1: Übersicht über die Versuchsergebnisse.	74
Tabelle 4-2: Aufgenommene Kräfte im Verhältnis der Füllungsdicken.	76
Tabelle 4-3: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und drei Schrauben je Glasauflager).	80
Tabelle 4-4: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und fünf Schrauben je Glasauflager).	80
Tabelle 4-5: Abhängigkeit von der Profilverdrehung.	81
Tabelle 5-1: Schalenelemente.	87
Tabelle 5-2: Stabelemente.	87
Tabelle 5-3: Kontaktelemente.	87
Tabelle 5-4: Vergleich zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen.	90
Tabelle 5-5: Aufgenommene Kräfte im Verhältnis der Füllungsdicken (Simulation).	94
Tabelle 5-6: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und drei Schrauben je Glasauflager).	96

Tabelle 5-7: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und drei Schrauben je Glasauflager).	96
Tabelle 5-8: Abhängigkeit von der Profilverdrehung.	97
Tabelle 6-1: Vergleich der ermittelten Werte für c_{GA} .	101
Tabelle 6-2: Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse mit [17].	104

1 Einführung

1.1 Einleitung

Die Fassade¹ ist die sichtbare Hülle oder Außenhaut und damit gewissermaßen das „Gesicht“ eines Gebäudes. Als solches ist sie seit jeher ein wichtiger Gegenstand architektonischer Gestaltung, aber auch eine Herausforderung für Ingenieure.

Eine Fassade muss eine Reihe ästhetischer und bauphysikalischer Anforderungen erfüllen.

Als „Gesicht“ soll eine Fassade oft den Charakter des im Gebäude ansässigen Unternehmens oder Institution nach außen repräsentieren. Viele große Unternehmen und Institutionen gestalten daher die Fassade ihres Sitzes möglichst aufwendig, um ein entsprechendes Bild zu vermitteln. Beispiele für repräsentative Fassaden sind die Zentrale der Deutschen Bank in Frankfurt am Main, der Bahn Tower und das Gebäude des Deutschen Bundestags in Berlin. Je nach Gestaltung und Expositionsgrad kann eine Fassade für einen Straßenzug oder sogar für das Stadtbild dominierend sein.

Als „Haut“ trennt eine Fassade den Innenraum eines Gebäudes von „außen“. Sie soll ein möglichst angenehmes Innenklima im Gebäude ermöglichen und das Außenklima ausschließen. Zu einem für Menschen behaglichen Raumklima gehören Raumtemperatur, Luftfeuchte und ausreichend natürliches, aber keinesfalls blendendes, Licht.

Weitere Funktionen, welche eine Fassade erfüllen soll, sind Schallschutz, sowohl von außen nach innen als auch von innen nach außen, Brandschutz, Schutz vor Einbruch und Diebstahl, sowie in neuerer Zeit auch Schutz vor Vandalismus und Terrorismus.

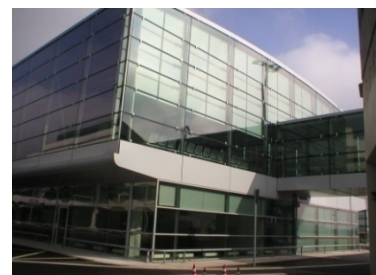


Abbildung 1-1: (von oben nach unten) Mittelalterliche Fassade, ©Stephen McCluskey; Natursteinfassade, ©Thermos; Glasfassade, ©FB Weber; Medienfassade in Glasfassade integriert, ©FB Weber.

¹ Die Definitionen der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe und Formelzeichen sind in Abschnitt 1.5 zu finden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Fassadensysteme entwickelt, welche man nach verschiedenen Gesichtspunkten systematisieren kann [26]:

- nach Fassadenaufbau,
- nach der Bauweise,
- nach Funktion und
- nach Materialauswahl.

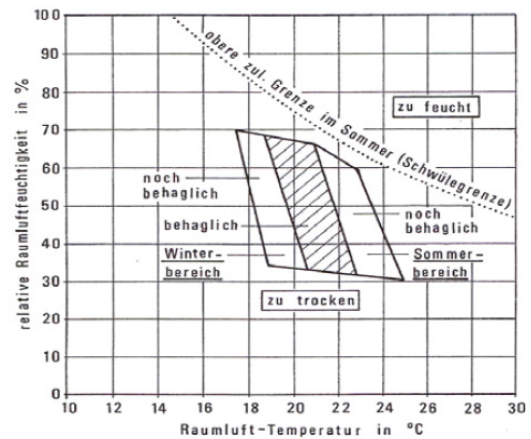


Abbildung 1-2: Behaglichkeitsfeld nach [15].

Eine Einordnung eines bestimmten Fassadentyps in nur eine konkrete Kategorie ist oftmals nicht möglich. Die Übergänge zwischen den Kategorien sind fließend und auf einen Fassadentyp treffen oftmals mehrere Merkmale zu. Die nachfolgende Tabelle soll einen Überblick über häufig vorkommende Fassadenarten geben.

Tabelle 1-1: Häufig vorkommende Fassadenarten [32].

Vorhangfassade		Betonfertigteilfeassade	
Elementfassade	Pfosten-Riegel-Fassade	mit offener Fuge	mit geschlossener Fuge

Tabelle 1-2: Häufig vorkommende Fassadenarten [32] (Fortsetzung).

Mauerwerk	Wärmedämmverbundsystem	Vorgehängte hinterlüftete Fassade	Trapezprofil-, Kassetten- und Sandwichkonstruktionen

Mittels Pfosten-Riegel-Konstruktionen lassen sich Fassaden mit großer lichtdurchlässiger Oberfläche und filigraner Tragstruktur herstellen. Der Lastabtrag erfolgt bei dieser Konstruktionsform über vertikale Profile (Pfosten), welche an dem Rohbau befestigt werden. An die vertikal verlaufenden Pfosten werden horizontale Riegel angeschlossen und schließlich werden die flächenfüllenden Elemente (z.B. Isolierglas oder Paneele) eingesetzt. Befestigt werden die Füllungselemente durch horizontale und vertikale Pressleisten, die meist durch Verschrauben mit den Pfosten und Riegeln verbunden werden. Als Konstruktionsmaterialien kommen Stahl, Aluminium oder Holz zum Einsatz.

Die Fassadenbauunternehmen stellen die speziellen Pfosten- und Riegelprofile meist nicht selbst her, sondern beziehen diese über einen Systemhersteller. Systemhersteller stellen standardisierte und zueinander passende Serien von Profilen und Zubehörteilen wie Dichtungen und T-Verbinder her. Diese so genannten Baukastenfassaden sind geprüft (Winddichtigkeit, Schlagregendichtigkeit...) und schnell ab Lager lieferbar. Systemhersteller für Pfosten-Riegel-Fassaden sind zum Beispiel *Schüco*, *Wicona*, *esco Ferro-Wic*, *Jansen*, *Raico* und *Forster*, wobei diese Aufzählung nicht abschließend ist.

Eine weitere, besonders wirtschaftliche Art, Pfosten-Riegel-Fassaden herzustellen, ist die Aufsatzfassade. Hier wird nicht das gesamte Pfosten- oder Riegelprofil von einem Systemhersteller geliefert, sondern nur ein glashaltendes Aufsatzprofil oder Grundprofil. Dieses kann auf nahezu beliebige schon vorhandene Unterkonstruktionen befestigt, also „aufgesetzt“ werden. So kann eine bestehende Tragkonstruktion unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen auch für die Fassadengestaltung genutzt werden, auf eine zusätzliche Tragkonstruktion für die Hülle kann verzichtet werden.

1.2 Anlass, Problemstellung und Zielsetzung

Mit der Moderne in der Architektur wurde versucht, der Fassade als Gebäudehülle den Charakter des „Trennenden“ zwischen Innen und Außen zu nehmen. Deshalb werden die Glasflächen gegenüber den Rahmenflächen immer größer. Eine filigranere Tragkonstruktion hält also immer großformatigere und damit auch schwerere Füllungen. Strengere Forderungen der Energieeinsparverordnung und damit einhergehend die vermehrte Nutzung von Dreifach-Isolierglas sowie das Erfordernis, für manche Bereiche Spezialverglasungen (Brandschutz, Schall- und Einbruchhemmung) zu verwenden, verstärken diesen Trend noch.

Das Eigengewicht der Isolierglasscheiben bzw. der Paneele wird über die Glasklötze und die Glasaufleger in die Riegel der Konstruktion eingeleitet. Bedingt durch die Konstruktionsweise der Pfosten-Riegel-Fassaden sind die Glasaufleger aus dem Riegel auskragende Elemente aus Metall oder Kunststoff, welche über Schraub- und Schweißverbindungen am Riegel befestigt werden.

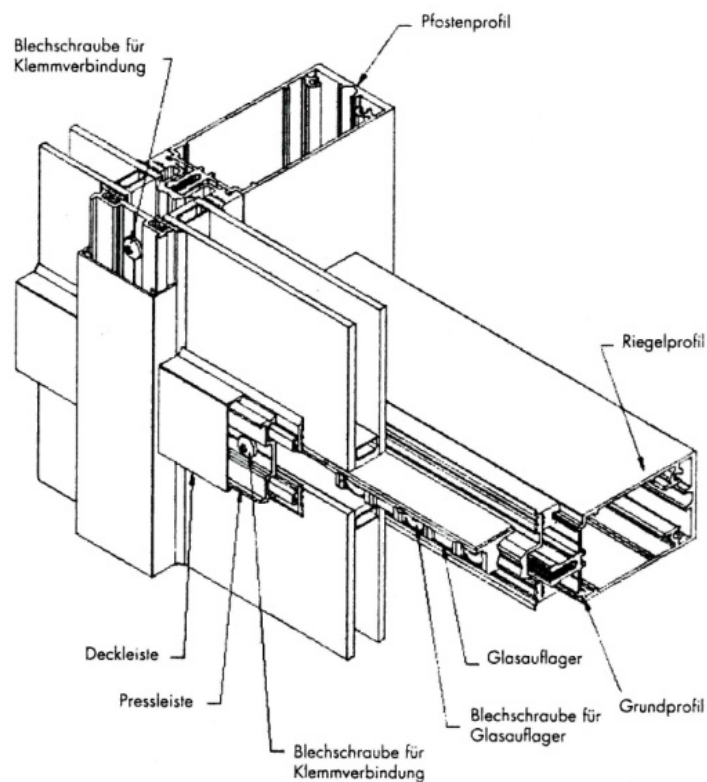


Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau einer Pfosten-Riegel-Fassade [12].

In der Vergangenheit wurden Schadensfälle bei Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit Isolierverglasung wie z.B. Bruch der inneren Scheibe oder undicht werden des Randverbundes und somit „Erblinden“ des Isolierglases beobachtet. Es besteht die Vermutung, dass diese Schadensfälle auf übermäßige Verformungen des Glasauflegers zurückzuführen sind.

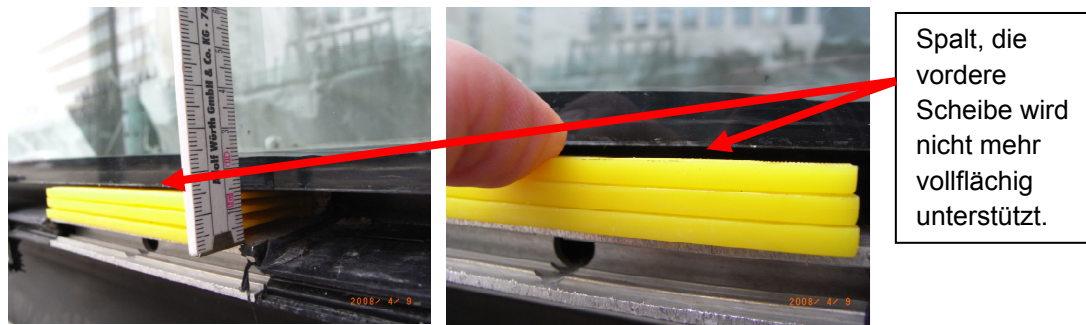


Abbildung 1-4: Unter Glasgewicht verformtes Glasauflager.

Daraus ergeben sich die Fragestellungen, wie groß die Tragfähigkeit der Glasauflager ist, wie sich das Glasauflager unter Last verformt und wo aufgrund der Gebrauchstauglichkeitsanforderungen für die gesamte Fassade Grenzen für die Verformung des Glasauflagers zu ziehen sind.

In der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag zur Beantwortung der oben aufgeworfenen Fragen geleistet werden. Im Wesentlichen sollen drei Hauptziele erreicht werden:

- 1) Der Aufbau und das Lastabtragungsverhalten einer systemspezifischen Glasauflagerkonstruktion soll theoretisch untersucht werden. Dabei soll im Besonderen geklärt werden, von welchen Einflussfaktoren das Verformungsverhalten abhängig ist. Einige Beziehungen zur Verformungsberechnung werden zusammengestellt.
- 2) Anhand von Bauteilversuchen soll qualitativ und quantitativ untersucht werden, wie vom betrachteten Fassadensystem abhängige Faktoren das Verformungsverhalten beeinflussen. Dazu werden verschiedene Glasauflagervarianten betrachtet.
- 3) Mit Hilfe der Versuchsergebnisse soll ein Finite-Elemente-Modell kalibriert werden, sodass in Zukunft Untersuchungen am Glasauflager mit diesem durchgeführt werden können und so die Anzahl der Bauteilversuche verringert werden kann.

Da es bis zum Zeitpunkt der Niederschrift dieser Arbeit keine verbindlichen Festlegungen² zum Thema Gebrauchstauglichkeit von Glasauflagern gibt, sowie keine Angaben darüber, wie die Tragfähigkeit von Glasauflagern zu bestimmen ist, werden zu diesen Punkten gesonderte Überlegungen angestellt.

² Siehe Abschnitt 1.3.

1.3 Stand der Technik

Zum Thema Glasaufleger finden sich in der Fachliteratur nur vereinzelte Quellen, es kann nicht von einem Stand der Technik gemäß [31] gesprochen werden. Im Folgenden werden die Inhalte der vorhandenen Literatur kurz zusammengefasst.

In den *DIBt-Mitteilungen* 5/2004 [12] werden Verwendbarkeitsnachweise für mechanische Verbindungen bei Pfosten-Riegel-Konstruktionen behandelt. Darunter fallen auch die Verbindungen zur Befestigung von Glasauflegern an Riegelprofilen.

Die Tragfähigkeit der Glasaufleger liegt nach [12] um ein Vielfaches höher als die zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gehörende Last. Gefährdung von Personen kann bei einem Versagen der Glasaufleger deshalb ausgeschlossen werden. Daher werden an Glasaufleger und die zugehörigen Verbindungen keine besonderen bauaufsichtlichen Anforderungen gestellt. Glasaufleger sind demnach ausschließlich für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu bemessen. In der Frage, woran die Gebrauchstauglichkeit festzumachen ist, positioniert sich das Deutsche Institut für Bautechnik nicht sauber. Es werden keine verbindlichen Grenzen festgelegt, sondern nur behauptet, dass in der Regel eine Grenzdurchbiegung von 1mm [12] eingehalten werden soll.

Über die Hintergründe dieser Aussage werden keine Angaben gemacht. Weiterhin wird nicht näher erörtert, ob dieser Wert mit oder ohne den Einfluss des Riegels einzuhalten ist, ob sich dieser Wert auf die Gesamtdurchbiegung des Glasauflegers oder auf die Höhendifferenz zwischen zwei Scheiben einer Isolierglaseinheit bezieht.

Weiterführende Gedanken sind bei *Baitinger/Busse/Masur* in [29] zu finden. Dort wird vorgeschlagen, Bauteilwiderstände entkoppelt für jede Lastrichtung und Beanspruchungsart zu untersuchen. Zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Bauformen soll außer der charakteristischen Maximallast auch jeweils die zu einer bestimmten Verformung gehörende Last angegeben werden. Für T-Verbindungen werden die Werte F_{2k} und F_{5k} als die zu 2mm bzw. 5mm (Index „2“ bzw. „5“) Verformung gehörenden charakteristischen Kräfte vorgeschlagen. Dieses Vorgehen kann grundsätzlich auch auf Glasaufleger übertragen werden. Um aber realitätsnahe Verformungsgrenzen bei Glasauflegern zu ermitteln und außerdem das Last-Verformungsverhalten bei einem Gebrauchstauglichkeitsnachweis besser berücksichtigen zu können, werden in [29] systematische Bauteilversuche gefordert.

Systematische Untersuchungen des Last-Verformungsverhaltens bei Glasauflegern sind nach Kenntnisstand des Verfassers bis dato nicht veröffentlicht worden. Von den Systemherstellern werden meist nur für konkrete Projekte Bauteilversuche durchgeführt. Glasaufleger sind bisher weder normativ noch durch bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. Die vom Glasaufleger aufnehmbaren Lasten können bisher nur den Verarbeitungsrichtlinien des jeweiligen Systemherstellers, z.B. [17], entnommen werden.

1.4 Aufbau der Diplomarbeit und Abgrenzung

1.4.1 Aufbau

Kapitel 1 führt in die Thematik ein und enthält für diese Arbeit grundlegende Definitionen und Bezeichnungen.

In *Kapitel 2* wird zuerst erläutert, wie ein Glasaufleger allgemein aufgebaut ist und einige Bauformen werden vorgestellt. Danach wird das Glasaufleger der Stahl-Aufsatzfassade *Ferro-Wictec 55-1 E* betrachtet und Überlegungen über die Tragwirkung angestellt. Es wird weiterhin gezeigt, von welchen Komponenten die Gesamtverformung abhängig ist und es werden Möglichkeiten für die Berechnung des Verformungsanteils einzelner Komponenten gegeben. Weitere Überlegungen beziehen sich auf mögliche Gebrauchstauglichkeitskriterien.

Die *Kapitel 3* und *4* umfassen den experimentellen Teil dieser Arbeit. Mit Hilfe von Bauteilversuchen soll das Last-Verformungsverhalten genauer untersucht werden. Die Anteile der verschiedenen in Kapitel 2 beschriebenen, vom betrachteten Fassadensystem abhängigen Verformungskomponenten an der Gesamtverformung sollen mit Hilfe einer Variantenuntersuchung quantifiziert werden.

Ein anhand der Versuchsergebnisse kalibriertes Finite-Elemente-Modell des Glasauflegers wird in *Kapitel 5* vorgestellt und die Rechenergebnisse werden mit den Versuchsergebnissen verglichen.

In *Kapitel 6* werden die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und ein Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen zum Thema Glasaufleger gegeben werden.

1.4.2 Abgrenzung

Außer in den *Kapiteln 1* und *2* wird in dieser Arbeit ausschließlich das Glasaufleger des Stahl-Aufsatzsystems *Ferro-Wictec 55-1 E*, vertrieben von der in Ditzingen ansässigen Firma *esco Metallbausysteme*, behandelt. Alle Aussagen beziehen sich auf ein bandlegierverzinktes und mittels Lochschweißung auf die Unterkonstruktion aufgebrachtes Grundprofil und auf die nach den dazugehörigen Verarbeitungsrichtlinien hergestellten Verbindungen. Es wird nur die Variante mit einem in das Grundprofil eingeschraubten Glasaufleger betrachtet.

Ein Übertragen der hier dargestellten Ergebnisse auf andere Konstruktionsvarianten oder gar auf andere Fassadensysteme ist im Einzelfall zu prüfen.

Weiterhin ist es nicht Ziel dieser Arbeit, eine theoretische Beziehung zur Berechnung der Glasauflegertragfähigkeit herzuleiten.

1.5 Begriffe und Bezeichnungen

Es folgen die Definitionen der Begriffe und Bezeichnungen, wie sie *in dieser Arbeit* verwendet werden. Grundlage für die verwendeten Bezeichnungen sind DIN 1080 [1] und DIN 18800 [2]. Alle hier nicht aufgeführten Bezeichnungen und Begriffe werden in den Kapiteln einzeln erläutert.

Bezeichnungen

Koordinaten und Bezugspunkte

- x Stablängsrichtung (Stabachse durch Schwerpunkt S)
- y, z Hauptachsen in der Querschnittsebene
- S Schwerpunkt
- M Schubmittelpunkt

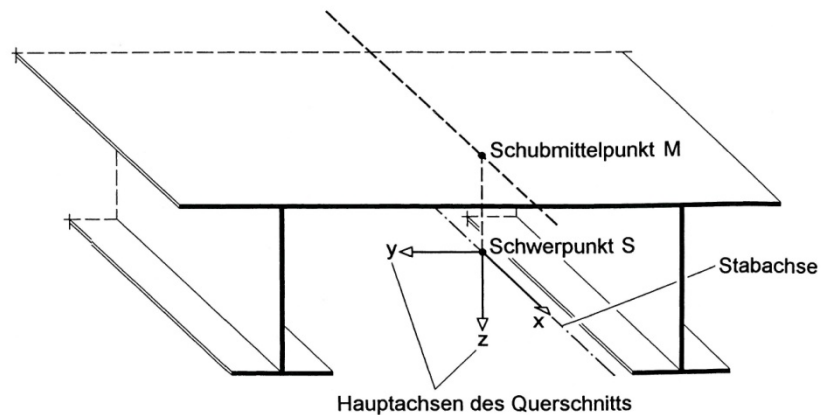


Abbildung 1-5: Koordinatensystem und Bezugspunkte bei Stäben [25].

Werkstoffkennwerte

- E Elastizitätsmodul
- G Schubmodul
- Querkontraktionszahl, *POISSON*sche Konstante

Zwischen den Werkstoffkonstanten E, G und ν besteht die Beziehung

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (1-1)$$

- f_y Streckgrenze (immer mit zusätzlichem Index)
- f_u Zugfestigkeit (immer mit zusätzlichem Index)
- $R_{p0,2}$ Dehngrenze bei maximal 0,2% zurückbleibender (plastischer) Dehnung

Teilsicherheitsbeiwerte

γ_M	Beiwert für Widerstandsgrößen, Grenzzustand der Tragfähigkeit
$\gamma_{M,ser}$	Beiwert für Widerstandsgrößen, Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
γ_F	Beiwert für Einwirkungen, Grenzzustand der Tragfähigkeit
$\gamma_{F,ser}$	Beiwert für Einwirkungen, Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Querschnittswerte

A	Fläche
I_y, I_z	Flächenträgheitsmomente 2. Ordnung um die Hauptachsen
I_T	Torsionsträgheitsmoment
W_y, W_z	Widerstandsmomente um die Hauptachsen
S_y, S_z	statische Momente

Einwirkungen, Lastgrößen

q_x, q_y, q_z	Streckenlasten
F_x, F_y, F_z	Einzellasten
M_T	Torsionsmoment
M_{yy}, M_{zz}	Biegemomente
$1'_x, 1'_y, 1'_z$	virtuelle Lasten
$1'_{yy}, 1'_{zz}$	virtuelle Biegemomente

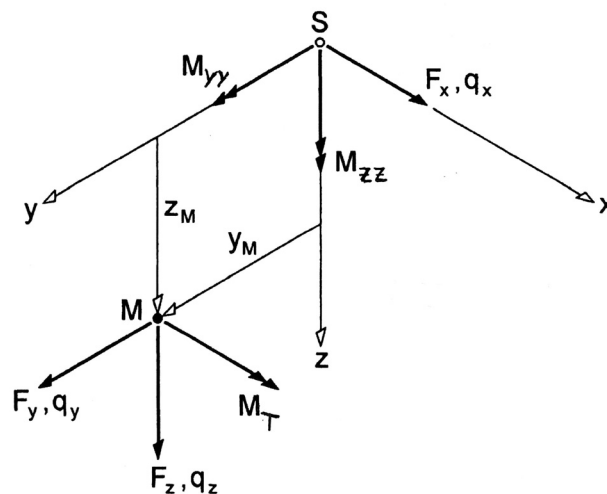
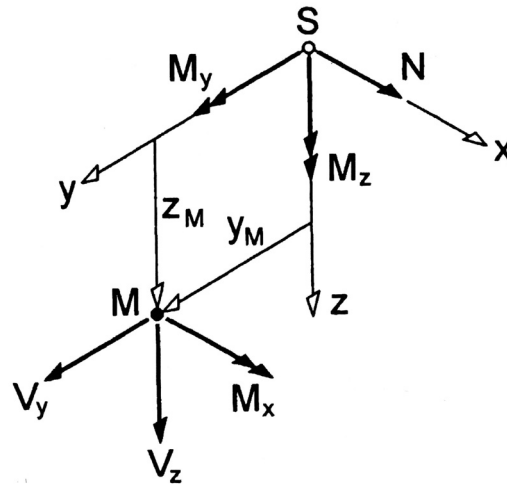


Abbildung 1-6: Wirkungsrichtungen und Angriffspunkte der Lastgrößen.

Schnittgrößen

N	Normalkraft
V_y, V_z	Querkräfte
M_y, M_z	Biegemomente
M_x	Torsionsmoment
$\overline{M}_y, \overline{M}_z$	virtuelle Biegemomente

**Abbildung 1-7:** Positive Wirkrichtung der Schnittgrößen.**Tabelle 1-3:** Schnittgrößen als Resultierende der Spannungen.

Normalkraft	$N = \int_A \sigma_x dA$
Biegemoment	$M_y = \int_A \sigma_x * z * dA$
Biegemoment	$M_z = - \int_A \sigma_x * y * dA$
Querkraft	$V_y = \int_A \tau_{xy} dA$
Querkraft	$V_z = \int_A \tau_{xz} dA$
Torsionsmoment	$M_x = \int_A [\tau_{xz} * (y - y_m) - \tau_{xy} * (z - z_m)] * dA$

Verschiebungsgrößen

f_x, f_y, f_z Verschiebungen in Richtung der x-, y- und z- Achse

$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ Verdrehungen um die x-, y- und z- Achse

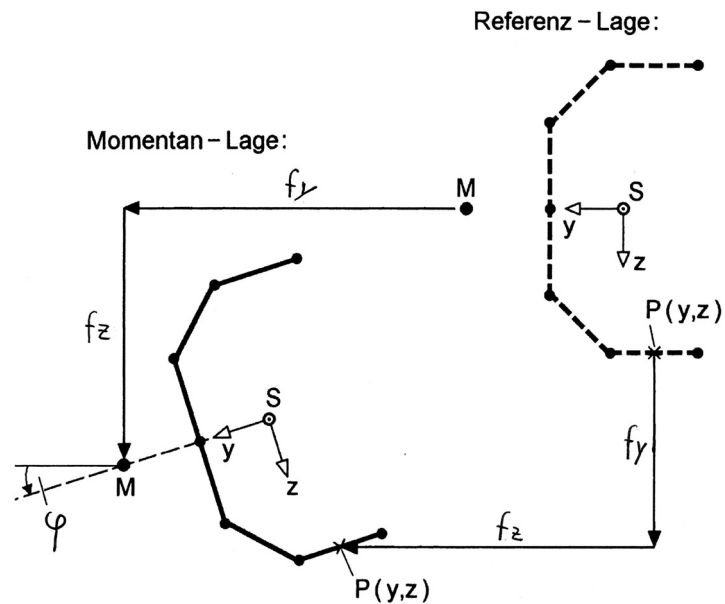


Abbildung 1-8: Definition der Verschiebungsgrößen.

Spannungen

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ Normalspannungen

$\tau_{xx}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ Schubspannungen

σ_v Vergleichsspannung

Indizes

Index el Schnittgröße nach Elastizitätstheorie

Index pl Schnittgröße nach Plastizitätstheorie

Index d Bemessungswert

Index k charakteristischer Wert

Index H horizontal

Index V vertikal

Index \parallel parallel zur Walzrichtung

Index \perp senkrecht zur Walzrichtung

Sonstige Bezeichnungen

c	Federkonstante in [mm/kN]
D	Drehfederkonstante in [rad/kN]
T	Temperatur [K]

Begriffe**Fassade**

Sichtbare Hülle oder Außenhaut eines Gebäudes.

Vorhangfassade (sinngemäß nach EN 13830 [4])

Fassade, welche außer Eigengewicht und Windlasten keine weiteren Lasten abträgt.

Pfosten-Riegel-Fassade

Konstruktionsmethode für Fassaden, bei welcher der Lastabtrag der Fassadenelemente (od. „Füllungen“) durch horizontale Tragelemente („Riegel“) in senkrechte Tragelemente („Pfosten“) und von da in die Unterkonstruktion bzw. den Baugrund erfolgt. Gehalten werden die Füllungselemente durch horizontale und vertikale Pressleisten. Als tragende Materialien kommen Stahl, Aluminium, Holz und zum Teil auch Kunststoff zum Einsatz.

Baukastenfassade

Modular aufgebaute Pfosten-Riegel-Fassade mit von einem Systemhersteller vorgegebenen und aufeinander abgestimmten Sonderprofilen. Durch eine weitgehend identische Grundkonzeption sind meist alle Fassadenvarianten eines Programms miteinander kombinierbar.

Aufsatzfassade

Ein auf verschiedene Unterkonstruktionen aufbringbares Fassadensystem. Die von einem Systemhersteller gegebenen Aufsatzprofile können auf nahezu beliebige Unterkonstruktionen aufgesetzt werden, dadurch entfällt das Stellen zusätzlicher Pfosten und Riegel.

Füllung

Opakes (licht- und blickundurchlässiges), transparentes (blickdurchlässiges) oder transluzentes (lichtdurchlässiges) Ausfachungselement zwischen Pfosten und Riegel.

Isolierglas, Mehrscheibenisolierglas

Eine aus mindestens zwei Flachglas-Scheiben zusammengesetzte Glaseinheit. Die Glasscheiben werden über einen luftdichten Randverbund miteinander gekoppelt und mit einem Abstandhalter voneinander getrennt. Der so entstehende Scheibenzwischenraum wird je nach Anforderung entweder mit getrockneter Luft oder mit Edelgasen wie Argon oder Krypton gefüllt.

Randverbund

Dauerelastische Verbindung zwischen den Einzelscheiben einer Isolierglaseinheit.

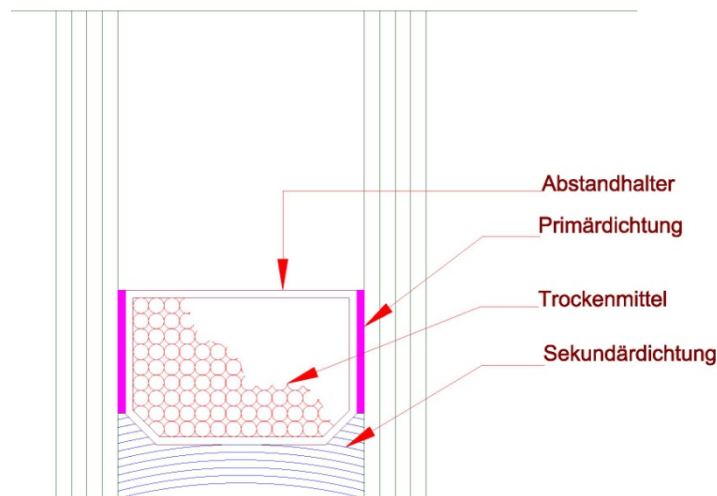


Abbildung 1-9: Aufbau Randverbund.

Glasklotz

Ein 80mm - 100mm langer Klotz variabler Dicke und Breite aus Kunststoff, vulkanisiertem Gummi oder Holz zur Aufnahme des Gewichts von Glaseinheiten. Glasklötze verhindern den Kontakt zwischen dem Rahmenmaterial und der Verglasungseinheit, verteilen das Glasgewicht und sollen einen eventuell vorkommenden Versatz der Glaskanten ausgleichen.

Prinzip der virtuellen Arbeit ([23], [25])

Auf im Gleichgewicht befindliche Körper wird ein virtueller, infinitesimal kleiner, mit den Randbedingungen verträglicher, Verschiebezustand aufgebracht. Die Summe der dabei geleisteten inneren virtuellen Arbeit und der virtuellen Arbeit, welche die äußeren Kräfte verrichten, ist gleich Null.

Aufgebrachte virtuelle Kräfte leisten in Richtung der auftretenden virtuellen Verschiebung Arbeit; virtuelle Momente dementsprechend entlang der virtuellen Verdrehung. Das Prinzip der virtuellen Arbeit wird zur Verformungsberechnung, aber auch Berechnung von Schnitt- und Stützgrößen bei statisch unbestimmten Systemen verwendet.

Arbeitsgleichung

Aus dem Prinzip der virtuellen Arbeit aufstellbare Grundgleichung. Für den sehr oft vorkommenden Sonderfall eines ebenen Stabtragwerkes mit zumindest abschnittsweise konstanten Querschnitts- und Materialeigenschaften sowie in M angreifenden Lasten ergibt sich die Arbeitsgleichung zu

$$E_0 I_0 * \bar{1} * \delta = \sum_n \dot{l}_n \int_0^1 \bar{M} M d\xi + \sum_n \dot{l}_n \int_0^1 \bar{N} N d\xi + \sum_n \ddot{l}_n \int_0^1 \bar{V} V d\xi + E_0 I_0 \sum_{(e)} \bar{C}_{(e)} C_{(e)} c_{(e)} - E_0 I_0 \sum_{(e)} \bar{C}_{(e)} \delta_{(e)} + \sum_n \ddot{l}_n \left[\int_0^1 M \frac{\Delta T}{h} d\xi + \int_0^1 \bar{N} T_s d\xi \right] . \quad (1-2)$$

Dabei bedeuten:

$$\sum_n \dot{l}_n \int_0^1 \bar{M} M d\xi \quad \text{Anteil aus Biegemomenten}$$

$$\sum_n \dot{l}_n \int_0^1 \bar{N} N d\xi \quad \text{Anteil aus Normalkräften}$$

$$\sum_n \ddot{l}_n \int_0^1 \bar{V} V d\xi \quad \text{Anteil aus Querkraften}$$

$$E_0 I_0 \sum_{(e)} \bar{C}_{(e)} C_{(e)} c_{(e)} \quad \text{Anteil aus Stützungsfederung}$$

$$-E_0 I_0 \sum_{(e)} \bar{C}_{(e)} \delta_{(e)} \quad \text{Anteil aus vorgegebener Stützungsverrückung (z.B. Baugrundsenkung)}$$

$$\sum_n \ddot{l}_n \left[\int_0^1 M \frac{\Delta T}{h} d\xi + \int_0^1 \bar{N} T_s d\xi \right] \quad \text{Anteil aus Temperaturänderung.}$$

Da für schlanke Stäbe ($l \gg h$) der Einfluss der Schub- und Normalkraftverformungen vernachlässigbar gering ist und in dieser Arbeit keine Einflüsse aus Temperatur und Stützensenkung betrachtet werden, vereinfacht sich die Arbeitsgleichung zu

$$E_0 I_0 * \bar{1} * \delta = \sum_n \dot{l}_n \int_0^1 \bar{M} M d\xi \quad (1-3)$$

mit der reduzierten Stablänge

$$\dot{l}_n = l_n \frac{E_0}{E_n} * \frac{I_0}{I_n} \quad \text{und}$$

δ der gesuchten Verschiebungsgröße.

Der Anteil aus Torsion ergibt sich aus der verallgemeinerten Arbeitsgleichung zu:

$$\delta = \int_0^1 \frac{\bar{M}_T M_T d\xi}{G * I_T} . \quad (1-4)$$

Scheibenstärke unterschiedlich, zumeist sind Glasklötze etwa 80mm - 100mm lang [22]. Ein Glasaufleger muss breit und lang genug sein, um den Klotz vollflächig zu unterstützen.

Einige Beispiele für konstruktive Ausführungen (Schnitte durch Glasaufleger) zeigt Abbildung 2-2.

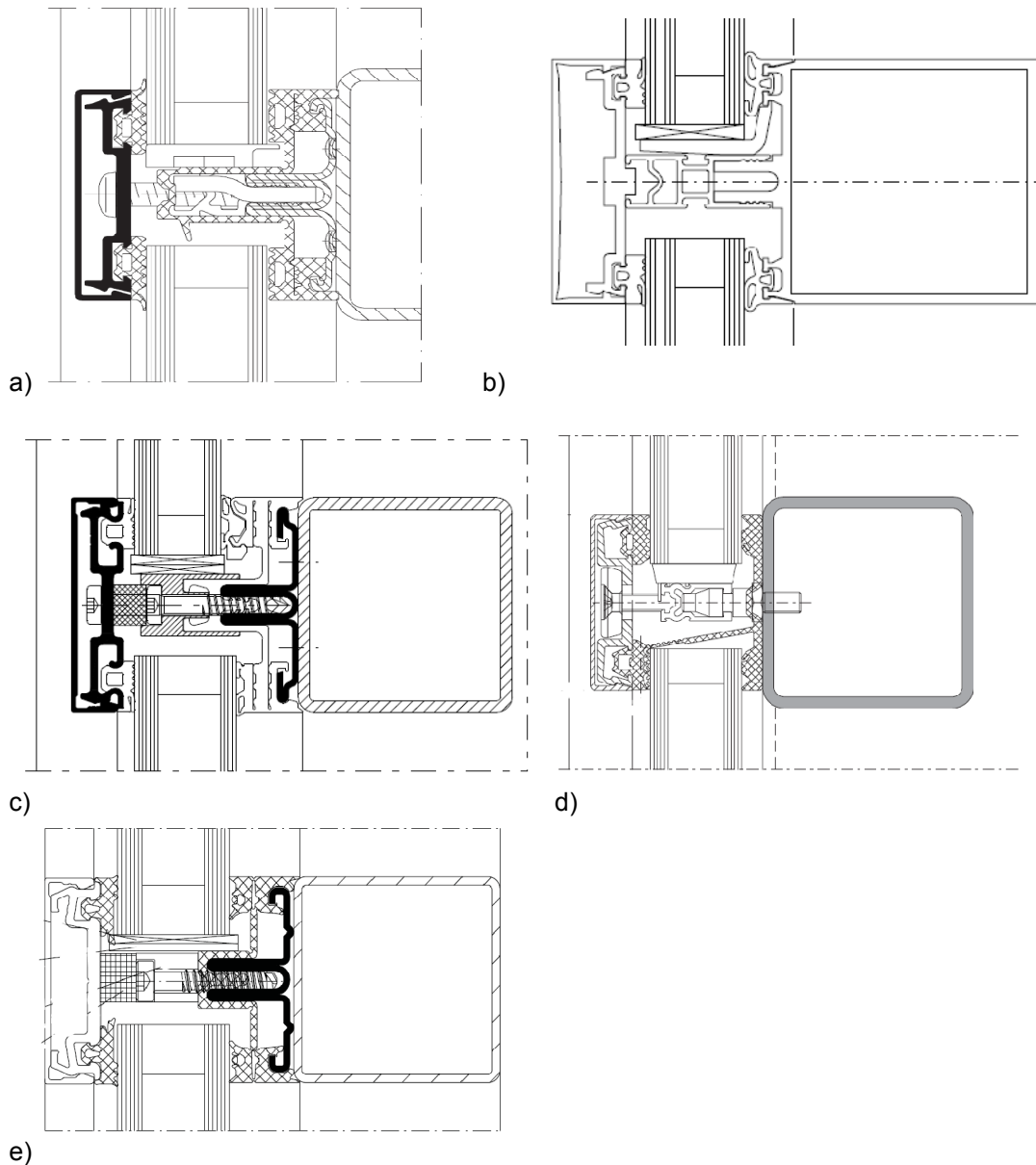


Abbildung 2-2: Beispiele für konstruktive Ausbildung. a) *Schüco FW 50+*; b) *Wicona Wictec 50*; c) *esco Ferro-Wictec 55-1 E*; d) *Jansen VISS Basic TV*; e) *Forster thermfix light*.

Diese Beispiele zeigen die Vielfalt an Möglichkeiten ein Glasaufleger konstruktiv auszubilden. Wie schon angedeutet gibt es auch innerhalb eines Fassadensystems unterschiedliche Konstruktionsvarianten. Leicht zu erkennen ist, dass sich die Tragmechanismen oftmals grundlegend unterscheiden und deshalb eine Vergleichbarkeit nur bedingt gegeben ist.

2.1.2 Glasauflager der Stahl-Aufsatzkonstruktion *Ferro-Wictec 55-1 E*

Die Systemreihe *Ferro-Wictec 55-1 E* ist eine Stahl-Aufsatzkonstruktion. Das Grundprofil kann beispielsweise mittels Lochschweißung, Schraubverbindung oder mittels Setzbolzenteknik mit der Unterkonstruktion verbunden werden. Diese Fügetechniken besitzen unterschiedliche Steifigkeiten, was Auswirkungen auf das Tragverhalten des gesamten Glasaufagers hat. Wie schon in Abschnitt 1.4 bemerkt, wird sich im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur auf die geschweißte Variante bezogen.

Das Grundprofil besteht aus kaltgewalztem, bandlegiert verzinkten Baustahl S280GD. Die für die Verbindung mit der Unterkonstruktion benötigten Bohrungen sind bereits vorhanden. Diese Bohrungen sind in regelmäßigen Abständen mit gleichem Durchmesser angeordnet und ergeben ein Bohrmuster. Die Lieferlänge für das Grundprofil beträgt standardmäßig 6m.

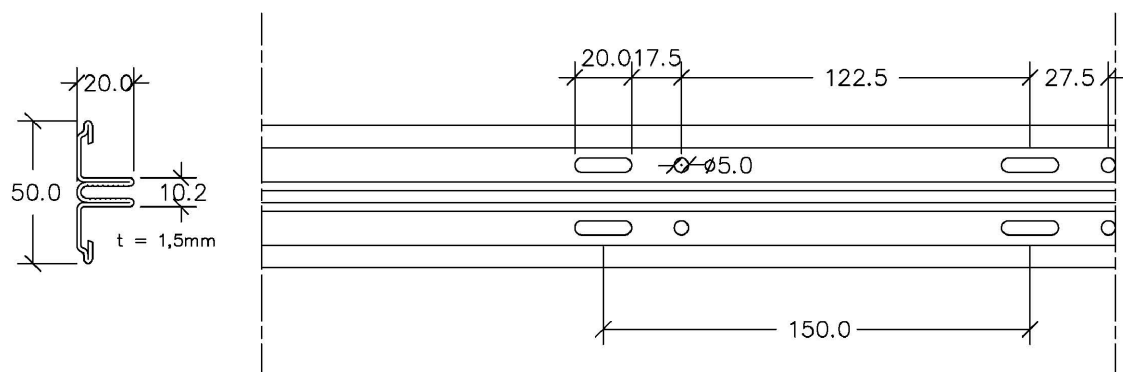


Abbildung 2-3: Geometrie Grundprofil Ferro-Wictec 55-1 E.

Das Glasauflager selbst besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit 5 integrierten Bohrlöchern und einer Aussparung für eine Lastabtragungsplatte aus Edelstahl, entsprechend den zwei möglichen Befestigungsvarianten (vgl. Abb. 2-6 und Abb. 2-7). Mit einem aufgeklebten Dichtteil wird die Wasserführung am Glasauflager gewährleistet [17].

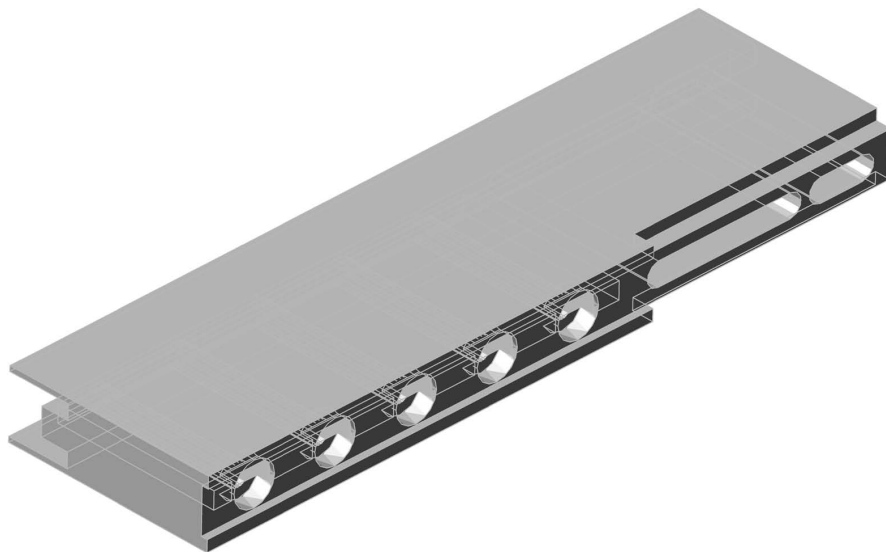


Abbildung 2-4: Isometrie Glasauflager.

Befestigt wird das Glasaufleger entweder mittels Schrauben, welche durch die integrierten Schrauböffnungen in den Schraubkanal des Grundprofils geschraubt werden oder mittels einer in das Grundprofil eingeschweißten Lastabtragungsplatte aus Edelstahl. Je nach Füllungsdicke und Füllungsgewicht ist die Schraubenanzahl zwischen zwei und fünf Schrauben je Glasaufleger nach statischen Erfordernissen zu variieren. Die maximale Tragfähigkeit der geschraubten Variante beträgt 3,5kN Füllungsgewicht. Mit dem im Schraubkanal eingeschweißten Edelstahlschwert sind nach den Verarbeitungsrichtlinien bis zu 5kN Füllungsgewicht möglich. Diese Variante kommt hauptsächlich bei hohen Lasten und großen Füllungsdicken (>40mm) zum Einsatz.

Nach erfolgter Montage des Grundprofils und der Füllung wird die Füllung mit einer Andruckleiste gegen das Grundprofil geklemmt und mit einer Abdeckleiste versehen. Die Andruckleiste dient der horizontalen Fixierung der Füllung und nimmt Windsoglasten auf. Weiterführende Angaben über das Fassadensystem, die Artikelnummern, die Wasserführung, die möglichen Füllungsdicken und Gewicht sowie eine genaue Montageanleitung sind den Verarbeitungsrichtlinien der Firma esco [17] zu entnehmen.

In den folgenden Abbildungen werden alle wichtigen Abmaße und Definitionen für das Glasaufleger der Stahl-Aufsatzkonstruktion Ferro-Witect 55-1 E dargestellt. Es wird auch die Variante mit eingeschweißter Lastabtragungsplatte gezeigt, da diese Modifikationen bei der Befestigung des Grundprofils im versuchstechnischen Teil dieser Arbeit (Kapitel 3) verwendet werden.

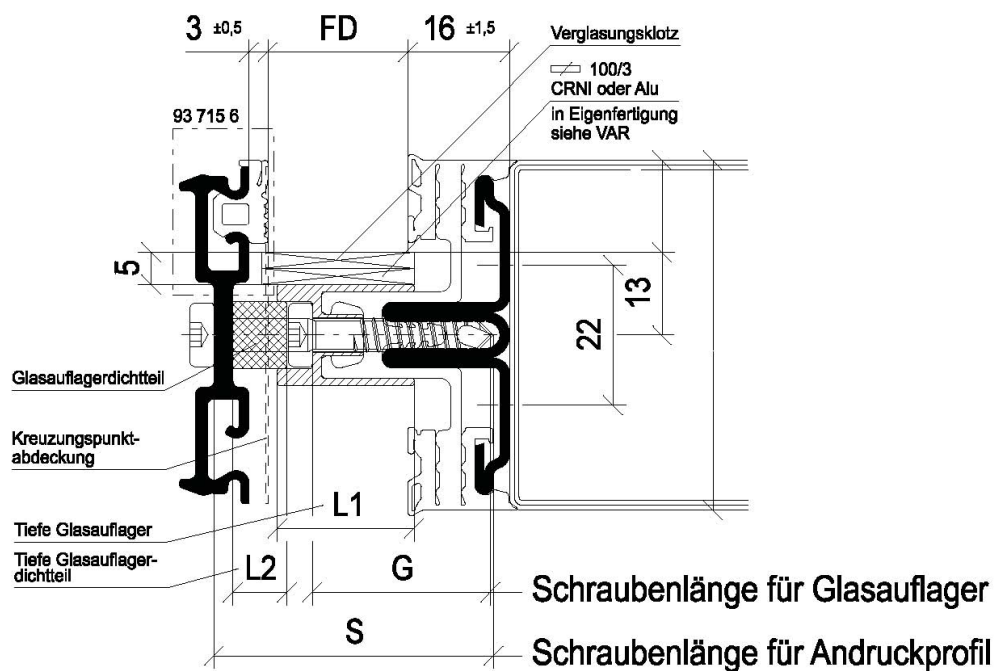


Abbildung 2-5: Definitionen am Glasaufleger.

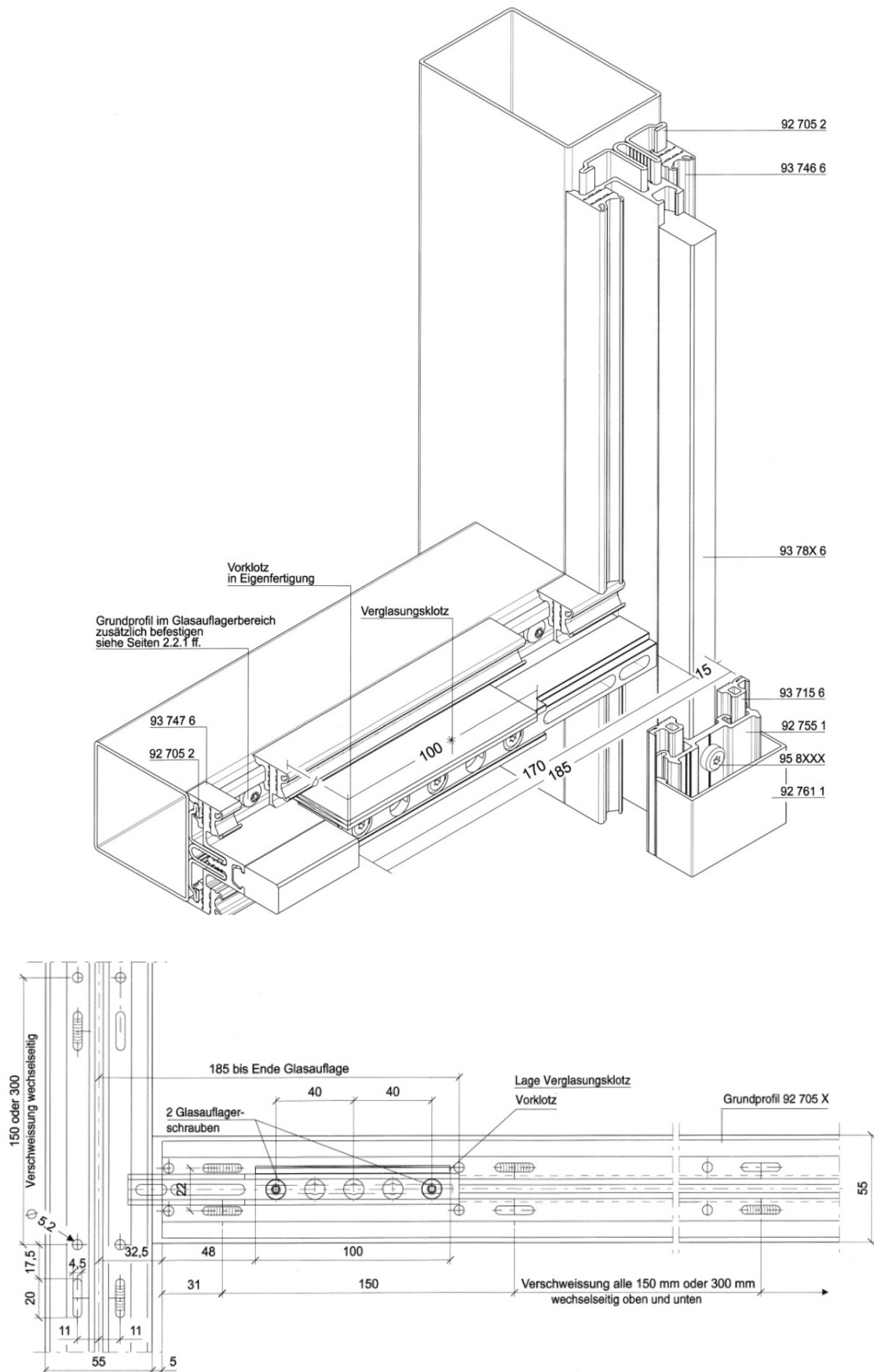


Abbildung 2-6: Grundprofil geschweißt mit geschraubtem Glasaufleger (2 Schrauben je Glasaufleger).

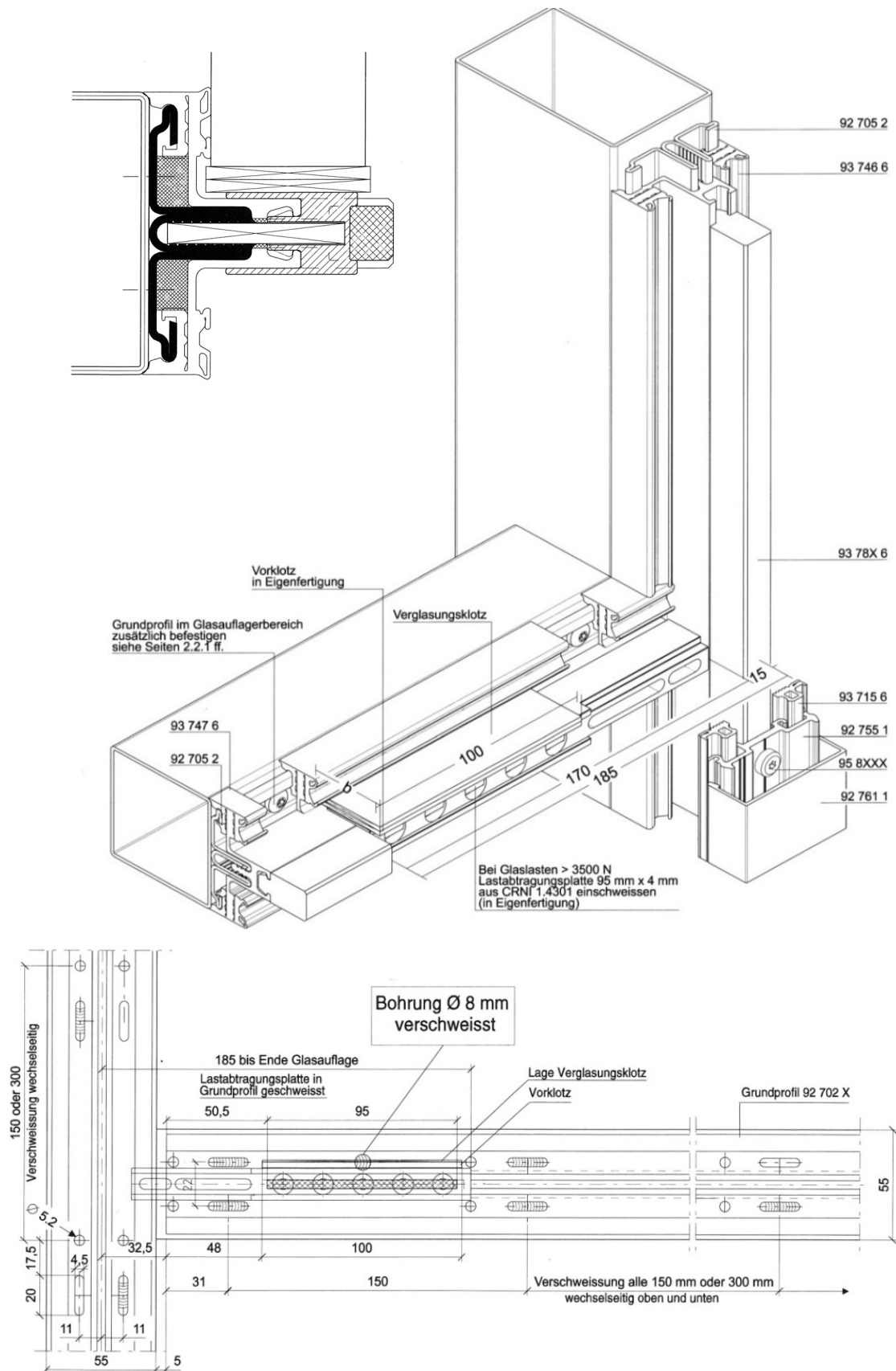


Abbildung 2-7: Grundprofil geschweißt, Glasaufleger mit Lastabtragungsplatte befestigt.

2.2 Tragverhalten einer ausgewählten Konstruktion

2.2.1 Strukturelles Tragverhalten

Wie in Abbildung 2-5 dargestellt, wird das Gewicht des Fassadenelementes außermittig in den Riegel eingeleitet. Die Glasauflasserschraube wird aufgrund des Füllungsgewichts auf Biegung und Querkraft belastet. Dies führt zu einer Biegebeanspruchung des Schraubkanals sowie zu einer Biege- und Verdrehbeanspruchung des Grundprofils. Die Verbindungen zwischen Grundprofil und Riegel nehmen die dadurch entstehenden Quer- und Zugkräfte auf. Weiterhin wird der Riegel auf Biegung, Querkraft und Torsion beansprucht. Schließlich muss diese Beanspruchung über eine T-Verbindung, entweder geschweißt oder mit Hilfe eines speziellen T-Verbinders, in den Pfosten und in die Bauanschlüsse weitergeleitet werden. Die nächste Abbildung zeigt die verschiedenen Anteile an der Verformung.

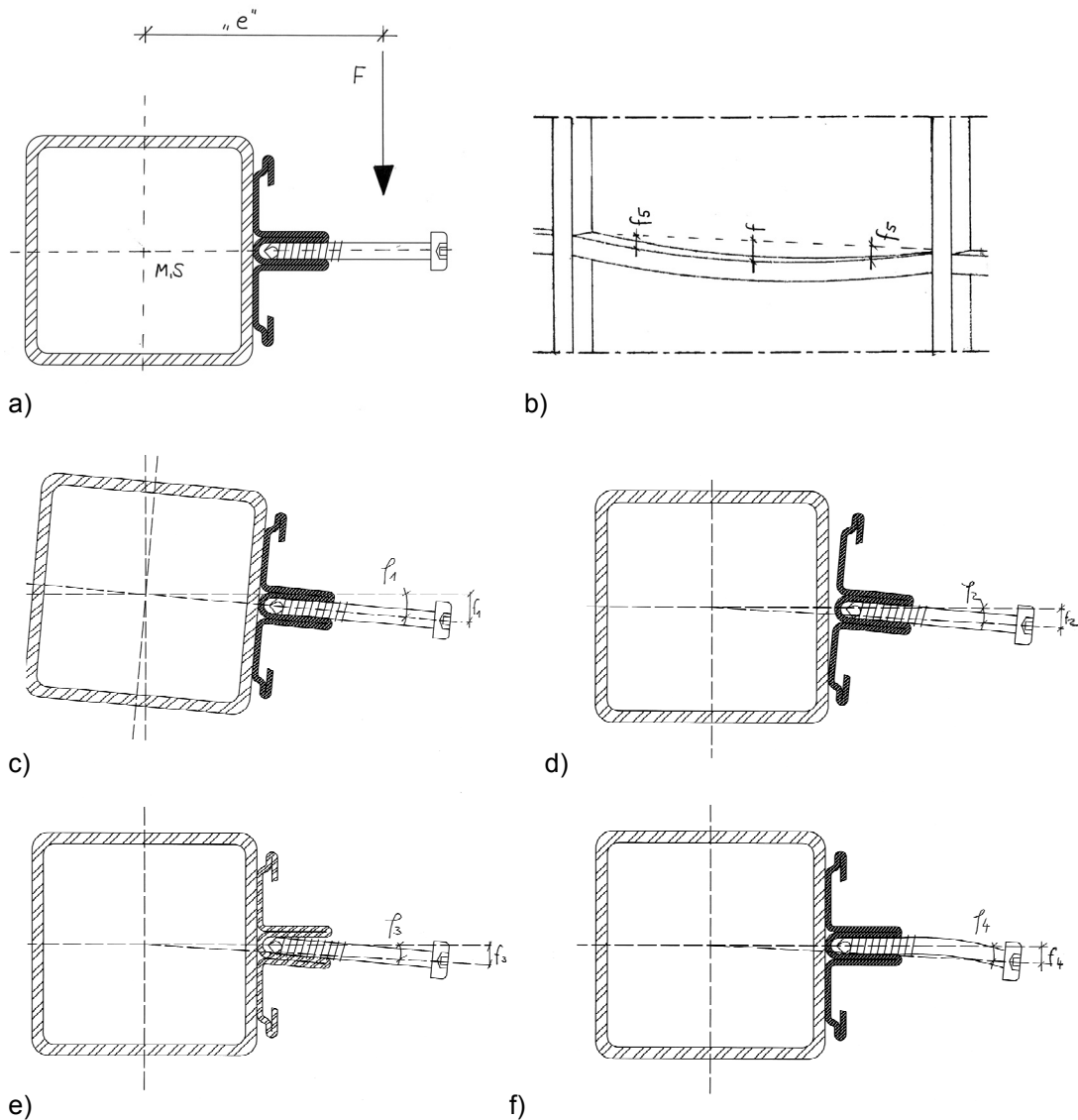


Abbildung 2-8: Verformungsmöglichkeiten eines Glasauflassers. Bild a) Ausgangszustand, b) Verformung des Riegels, c) Verdrehung des Riegels, d) Verdrehung Grundprofil, e) Biegung Schraubkanal, f) Biegung der Schraube.

Die für das auf den Riegel einwirkende Torsionsmoment verantwortliche Exzentrizität e ist der Abstand vom Schubmittelpunkt M des Riegelprofils zum Schwerpunkt der Füllung. Die Exzentrizität hängt demnach von der Füllungsdicke, dem Füllungsgewicht und dem Aufbau der Füllelemente ab. Beim Ansatz einer Isolierverglasung vereinfacht sich die Bestimmung von e auf

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i \cdot d_i)}{d_i} \quad (2-1)$$

Wobei

s_i den Abstand des Scheibenmittelpunktes zum Schubmittelpunkt und

d_i die jeweilige Scheibendicke

bedeuten. Wenn sich die Materialien oder Formate der Füllelemente innerhalb einer Füllung unterscheiden, ist die Exzentrizität unter Berücksichtigung der Massen zu ermitteln.

$$F = \sum F_G / 2 \quad (2-2)$$

mit $\sum F_G$... Füllungsgewicht.

Den vorangegangenen Überlegungen zufolge lassen sich folgende an der Gesamtverformung am Glasauflager beteiligte Systemkomponenten extrahieren:

- das Glasauflager selbst,
- der Riegel,
- die T-Verbinder und schließlich
- der Pfosten.

Kennt man die Verformungsanteile aller Komponenten, kann man durch Addition die Gesamtverformung am Glasauflager ermitteln. Deshalb werden im Folgenden diese Komponenten untersucht und ihr Anteil an der Gesamtverformung angegeben.

Anteil des Glasauflagers

Der Anteil des Glasauflagers an der Gesamtverformung setzt sich wiederum aus verschiedenen Komponenten zusammen: Biegung der Schraube, Biegung des Schraubkanals und Verdrehung des Grundprofils. Die Glasaufлагerschraube wird über den Glasklotz und das Glasauflagerformstück (vgl. Abbildung 2-5) primär durch das Füllungselement belastet.

Vom statischen System her ist die Glasaufлагerschraube ein federnd eingespannter Kragarm, belastet durch eine Einzellast F_z (das halbe Füllungsgewicht), welche in einem vom Scheibenaufbau abhängigen Abstand von der Einspannstelle angreift. Die Verformung der Schraube wird von der Kraglänge und damit der Füllungsdicke, dem Aufbau des Füllungselements, den Querschnittswerten und den nichtlinearen Materialeigenschaften der Schraube, sowie der Steifigkeit der Einspannung bestimmt. Die verschiedenen

Materialeigenschaften werden in Abschnitt 2.2.2 näher erläutert, die Angaben zur Geometrie der verwendeten Glasaufegerschrauben sind in Anhang 03 dargestellt.

Eine schematische Darstellung des Kraftflusses am Glasaufleger zeigt Abbildung 2-9. Der Schraubkanal wird durch das Gewicht der Füllung in vertikaler Richtung als Querkraft und durch das Einspannmoment belastet (Abbildung 2-9 (1) und (2)). Durch die diametral wirkenden Einspannkräfte (3) werden die Lippen des Schraubkanals in entgegengesetzter Richtung verformt, was zu einem Aufbiegen des Schraubkanals und somit zu einer Vergrößerung des Öffnungswinkels führt. Durch dieses Aufbiegen erfährt die Schraube eine zusätzliche Rotation, welche es bei einer starren Einspannung nicht geben würde.

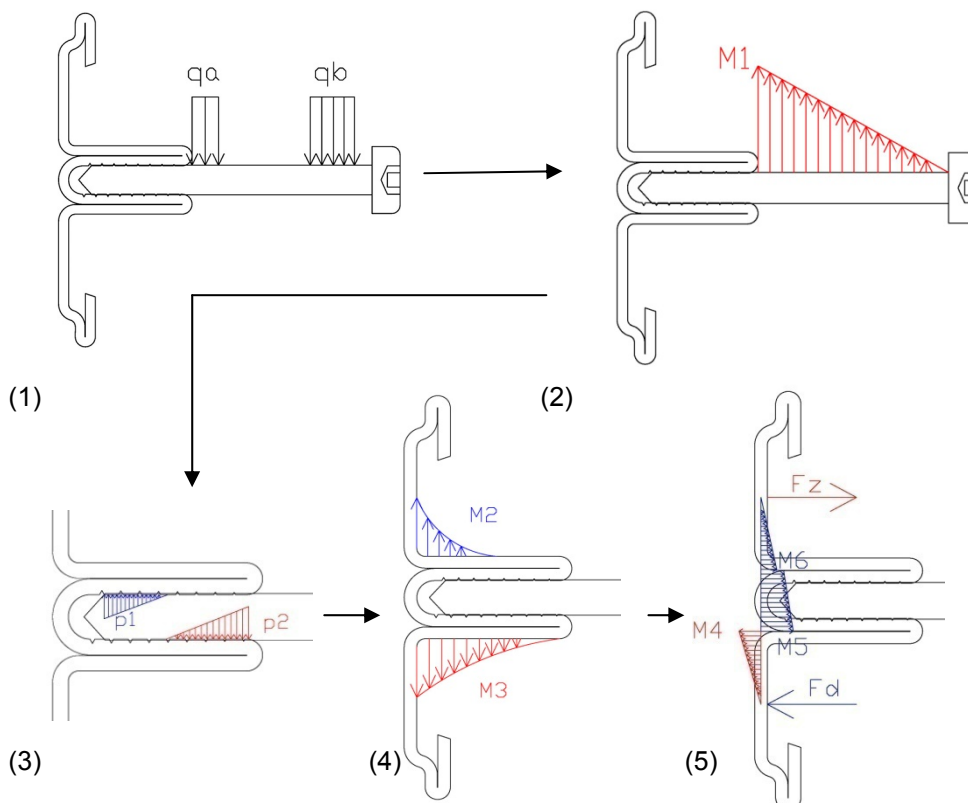


Abbildung 2-9: Schematische Lastabtragung am Glasaufleger unter einer ausgewählten Belastungssituation.

Die Steifigkeit des Schraubkanals wird hauptsächlich durch die Blechstärke des Grundprofils ($t=1,5\text{mm}$) und den Schraubenabstand bestimmt. Der Schraubenabstand, welcher durch die verwendete Schraubenanzahl ($n=2$ bis $n=5$) festgelegt ist, ist relevant, weil der Lastabtrag im Schraubkanal nicht nur in Schraubenrichtung, sondern auch senkrecht dazu stattfindet.

Anschaulich kann man sich den Schraubkanal als eine Schar nebeneinanderliegender, miteinander gekoppelter Kragträger vorstellen. Der primär durch die Schraube belastete Kragträger wird gemäß seiner Steifigkeit verformt. Die angrenzenden Kragträger erhalten immer weniger Last und verformen sich deshalb auch weniger, bis ab einiger Entfernung wieder ein ungestörter Bereich vorliegt. Die sinnbildlichen Kragträger sind aber starr miteinander gekoppelt, deshalb kann keine Klaffung zwischen den Stabelementen

entstehen. Um diese Gleichgewichtsbedingung zu erfüllen wirkt außer der Spannung in Richtung der Kragelmente noch eine Spannung senkrecht dazu. Weitere Informationen über diese Tragwirkung sind unter den Stichworten „Plattentheorie“, „Lastverteilungsbreite“ bzw. „Einflussbreite“ in der Literatur – z.B. [28] – zu finden.

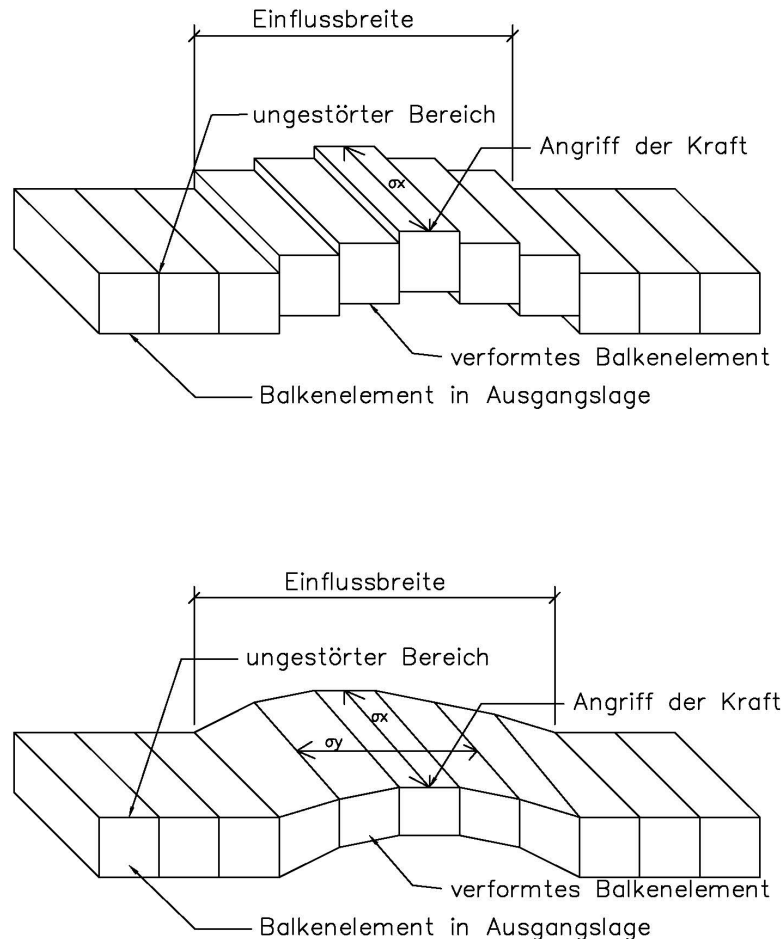


Abbildung 2-10: Schraubkanal als Balkenschar (oben) und mit erzwungenem Ebenbleiben des Querschnittes (unten).

Wenn im Einflussbereich einer Schraube noch andere Schrauben angeordnet werden summieren sich sowohl die Spannungen wegen der zweiachsigen Biegung aufgrund der Plattenwirkung als auch die Verformung des Schraubkanals.

Da die Kontaktfläche zwischen Glasaufлагerschraube und Schraubkanal sehr klein und der Schraubkanal dünnwandig ($t < 3\text{mm}$) ist, ist zu erwarten, dass in diesem Bereich frühzeitig nichtlineare Verformungen auftreten (vgl. Baitinger et al. [29]). Zusätzlich ist bei größeren Gesamtverformungen damit zu rechnen, dass eine Kraftumlagerung stattfindet.

Im weiteren Verlauf der Lastweiterleitung führt das Biegemoment im Schraubkanal zu einer Verdrehung des Grundprofils. Wie in Abbildung 2-5 dargestellt, befindet sich das Glasauflager zwischen den Befestigungspunkten von Grundprofil zur Unterkonstruktion. Durch eine Biegebeanspruchung des Schraubkanals kommt es zu einer Verformung des oberen Teils des Grundprofils zwischen den Befestigungspunkten aus der Ebene hinaus (vgl. Abbildung 2-8 Punkt d). Der untere Teil kann seine Lage aufgrund des dahinter liegenden Riegelprofils nicht verändern. Durch die daraus resultierende Schiefstellung des Grundprofils folgt eine zusätzliche Rotation der Glasaufлагerschraube.

Beeinflusst wird das Verformungsverhalten des Grundprofils hauptsächlich über die Art und Anordnung der Verbindungen zum Riegelprofil. Während man die Verbindung mittels Lochschweißung als steif einordnen kann, sind die Verbindungen mittels Schrauben und Setzbolzen nachgiebig. Durch diese Nachgiebigkeit an den Auflagern ist anzunehmen, dass sich die Verdrehung des Grundprofils vergrößert. Der bei Glaslasten > 3,5kN zusätzlich anzuordnende Schweißpunkt über dem Glasauflager (Abbildung 2-7) wirkt der Verdrehung entgegen.

Aufgrund der komplexen Tragwirkung und dem nichtlinearen Materialverhalten der Schraube ist es nicht möglich, den Anteil der Verformung des Glasaufлагers an der Gesamtverformung mit einfachen Rechenverfahren zu berücksichtigen. Wie groß der jeweilige Einfluss auf das Gesamtverhalten ist, kann nur durch Bauteilversuche geklärt werden. Das zusammengesetzte Modell könnte mit geeigneter Software, z.B. mit der Finite-Elemente-Methode untersucht werden.

Zur vereinfachten Verformungsberechnung wird an dieser Stelle vorgeschlagen, die Anteile aus Verdrehung des Grundprofils, Biegung des Schraubkanals und Biegung der Schraube zu einer Streckenfeder c_{GA} zusammenzufassen. Die Federkonstante c_{GA} wäre eine experimentell für jede Ausführungsvariante bestimmbare Konstante. Mit der Angabe dieses Wertes ließen sich schnell die Verformungen für Glasauflager verschiedenster Bauarten bestimmen und miteinander vergleichen.

Nach dieser vereinfachten Methode würde sich die Verformung des Glasaufлагers ohne Einfluss der Unterkonstruktion zu

$$f_{z, \text{Glasauflager}} = F * c_{GA} \quad (2-3)$$

ergeben.

Anteil des Riegels

a) Durchbiegung

Einen sehr großen Anteil an der Gesamtverformung hat die Verdrehung des Riegelprofils aufgrund der Hebelgesetze. Sowohl die Riegelverdrehung als auch die Riegelverformung am Glasauflager kann mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Technischen Mechanik ausreichend genau ermittelt werden.

Mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Arbeit wird die vertikale Verformung an der Stelle des Glasaufagers ermittelt:

$$f_{z,\text{Riegel}} * E * I_z * \overline{1}_z = \sum_n l_n \int \overline{M}_z * M_z dl \quad (2-4)$$

$$f_{z,\text{Riegel}} = \frac{2 * F_z * a^2 * (\frac{3}{4} * l - a)}{3 * E I_z} \quad (2-5)$$

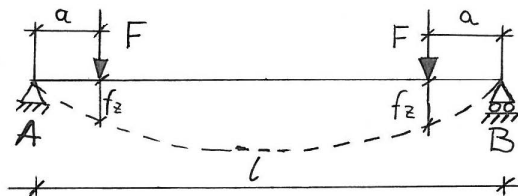


Abbildung 2-11: Statisches System Riegel.

In diesen Gleichungen bedeuten:

l ... die Riegellänge

a ... der Abstand des Glasaufagers zur Riegelaußenkante.

b) Verdrehung

Unter der Annahme eines ausreichend steifen T-Verbinders (Verdrehung an der T-Verbindung ist gleich Null) ergibt sich die Verdrillung aus dem *HOOKE*schen Gesetz und der 1. *BREDT*schen Formel zu

$$\phi_x = \frac{M_x}{G * I_T}, \quad (2-6)$$

mit der Exzentrizität e aus (2-1) und dem Abstand a folgt die Verdrehung

$$\phi_{x,\text{Riegel}} = \frac{F * e * a}{G * I_T} \quad [\text{rad}]. \quad (2-7)$$

Eine in vielen Anwendungsfällen zutreffende Schätzung für a ist $a = 15\text{cm}$. Dieser Wert ergibt sich daraus, dass der Abstand zwischen einem Glasklotz und der Ecke einer Verglasungseinheit (Verglasungen sind die am häufigsten vorkommenden Füllungen bei Pfosten-Riegel-Fassaden) eine Klotzlänge betragen sollte ([11], [22]). Eine Klotzlänge beträgt in der Regel 100mm ([22]). Geht man davon aus, dass der Kraftübergang in der Mitte

des Glasklotzes konzentriert ist und die Verglasung in etwa bis zur Systemlinie des Pfostens reicht, ergibt sich $a = 100\text{mm} + 100\text{mm}/2 = 150\text{mm} = 15\text{cm}$.

In den nachfolgenden Diagrammen wird die Verdrehung und Vertikalverformung am Glasauflager für einige Riegellängen in Abhängigkeit des Riegelträgheitsmoments aufgetragen, um deren Größe besser einschätzen zu können. Zu Vergleichszwecken wird nicht nur Stahl, sondern auch Aluminium und Holz (Festigkeitsklasse C 24) betrachtet.

Die Diagramme sind für $a = 15\text{cm}$ (statisches System siehe Abbildung 2-11), unter der Annahme einer verdrehsteifen T-Verbindung und ohne Berücksichtigung des Eigengewichts erstellt worden. Die Ablesewerte für die vertikale Verformung sind mit dem gesamten Füllungsgewicht in [kN] zu multiplizieren, die Ablesewerte für die Verdrehung mit dem auftretenden Torsionsmoment $M_T = F_z \cdot e$ in [kNm]. Zwischenwerte können linear interpoliert werden.

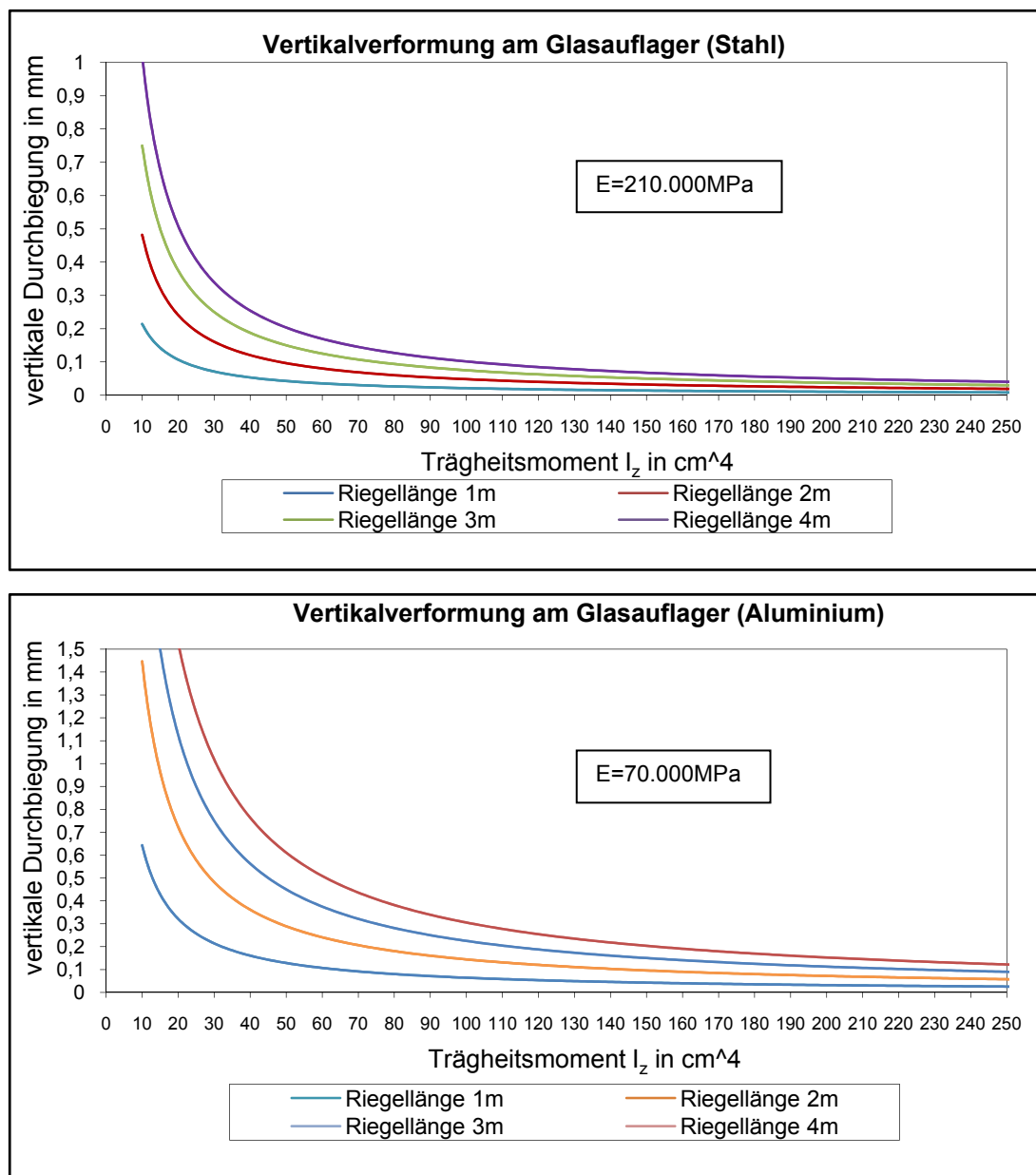


Abbildung 2-12: Verformung am Glasauflager für Riegel aus Stahl und Aluminium.

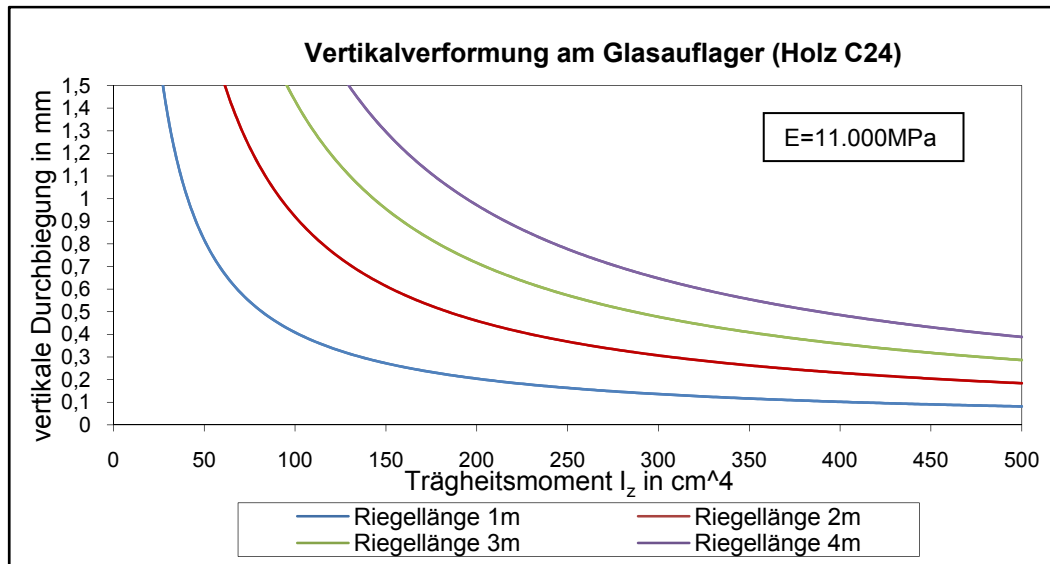


Abbildung 2-13: Verformung am Glasaufleger für Riegel aus Holz.

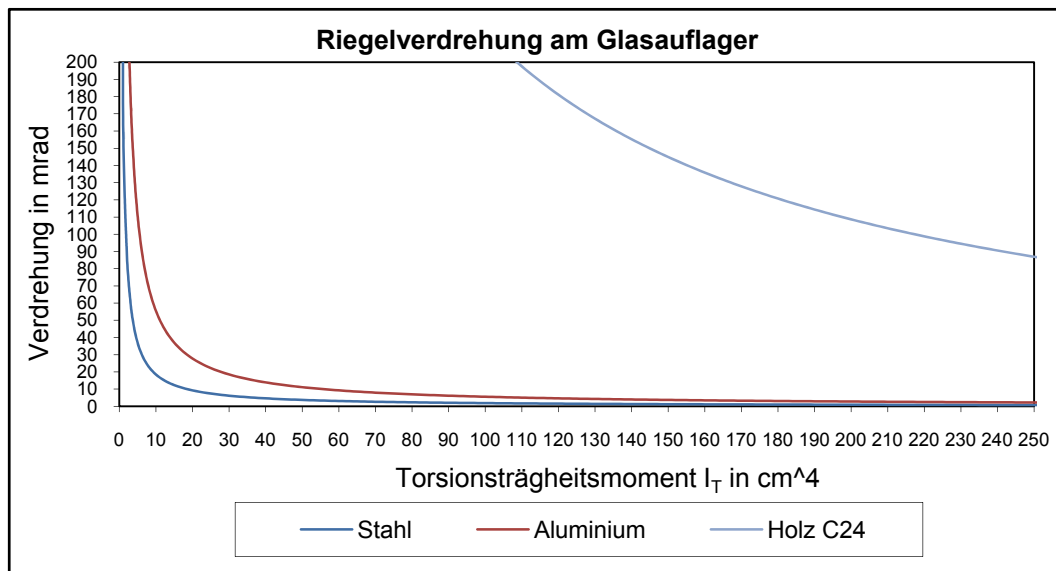


Abbildung 2-14: Riegelverdrehung am Glasaufleger in [mrad].

Die Vertikalverformung am Glasaufleger kann nicht beliebig groß werden. Die maximale vertikale Durchbiegung in Riegelmitte wird nach der Produktnorm für Vorhangfassaden [4] auf $l/500$, maximal jedoch 3mm begrenzt. Damit wird je nach Gewicht und Riegelspannweite ein erforderliches Trägheitsmoment I_z festgelegt. Da Flächenträgheitsmoment und Torsionsträgheitsmoment I_T rein geometrische Größen sind, stehen beide in einem gewissen Zusammenhang, wobei hier zwischen offenen und geschlossenen Profilen unterschieden werden muss. Durch die Begrenzung der vertikalen Verformung wird demnach indirekt auch die Verdrehung begrenzt.

Die in Abbildung 2-14 zusammengefassten Diagramme zeigen die erforderlichen Trägheitsmomente I_z in Abhängigkeit von Riegelänge und Füllungsgewicht für die Werkstoffe Stahl, Aluminium und Holz (Festigkeitsklasse C 24). Die erforderlichen Riegelträgheitsmomente wurden mit $a = 15\text{cm}$ berechnet, Zwischenwerte können linear interpoliert werden.

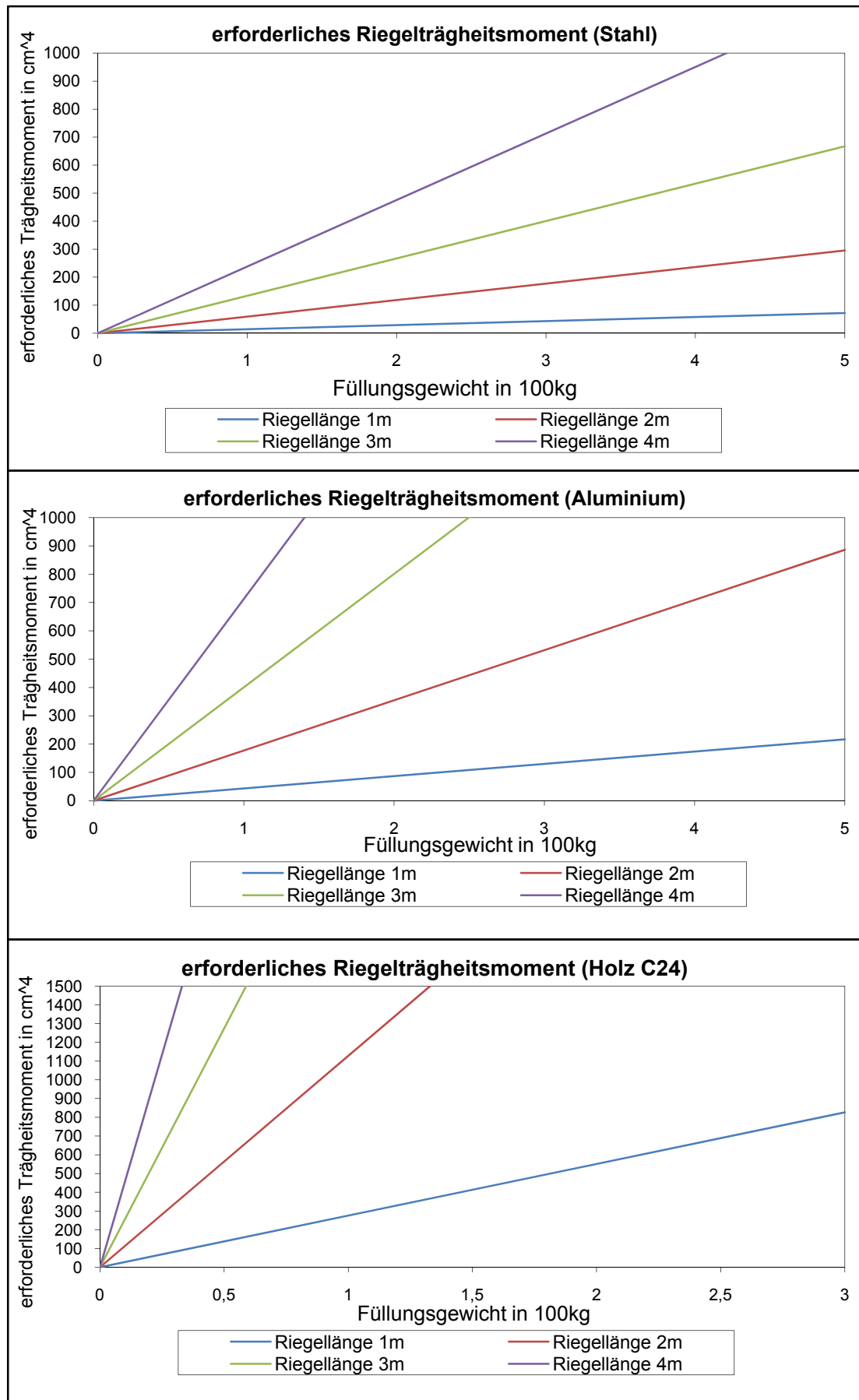


Abbildung 2-15: Erforderliche Riegelträgheitsmomente I_z unter Berücksichtigung einer Verformung von $l/500$, maximal 3mm.

Aus der Verdrehung $\varphi_{x,\text{Riegel}}$ kann die resultierende Verformung f_z an der Spitze des Glasaufagers bestimmt werden:

$$f_{z,\text{Riegel},\varphi_x} = l_g * \tan \varphi_{x,\text{Riegel}} \quad (2-8)$$

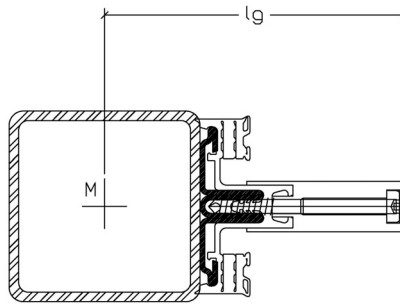


Abbildung 2-16: Definition l_g .

Der gesamte Anteil der Riegelverformung an der Gesamtverformung am Glasauflager ergibt sich mit (2-5), (2-7) und (2-8) zu

$$f_{z,\text{ges},\text{Riegel}} = \frac{2 * F * a^2 * (\frac{3}{4} * l - a)}{3 * EI} + l_g * \tan \left[\frac{F * e * a}{G * I_T} \right] \quad (2-9)$$

Anteil der T-Verbindung

Die T-Verbindung muss Lasten aus Eigengewicht, Wind und die aus diesen Lasten resultierenden Biege- und Torsionsbeanspruchungen aufnehmen. In der Praxis wird der Riegel meist als ein ideal gelenkig, vertikal und horizontal unverschieblich gelagerter und torsionssteif angeschlossener Balken idealisiert (Einfeldträger). Bei geschweißten T-Verbindungen ist diese Annahme durchaus gerechtfertigt. Bei der Verwendung von geschraubten T-Verbindungen ist aber davon auszugehen, dass am Anschluss Verschiebungen und Verdrehungen auftreten.

Bei solchen vom Systemhersteller entwickelten Verbindungen handelt es sich um so genannte unregelmäßige T-Verbindungen, deren Trag- und Verformungsverhalten i.d.R. nicht nach den geltenden technischen Baubestimmungen (z.B. [2]), sondern nur durch Versuche bestimmt werden kann ([12]).

In [29] wird angeregt, die Verformungscharakteristik für jede Lastrichtung getrennt zu untersuchen. So kann vereinfacht für jede Lastrichtung eine Federsteifigkeit bzw. für Torsions- und Biegebeanspruchungen eine Drehfedersteifigkeit ermittelt werden.

Der Anteil der Verformung der T-Verbindung an der Gesamtverformung ergibt sich zu

$$f_{z,\text{Verbinder}} = F * c_v + l_g * \tan[F * e * D], \quad (2-10)$$

c_v ... Federsteifigkeit vertikal (aus Versuchen) in [mm/kN],

D ... Drehfedersteifigkeit bei Torsion (aus Versuchen) in [rad/kNm],

l_g ... Strecke vom Schubmittelpunkt des Riegelprofils bis zur Spitze des Glasaufagers.

Anteil der Pfosten

Das Torsionsmoment M_x , welches im betrachteten Fall M_T entspricht, wird über die T-Verbindung in den Pfosten weitergeleitet. Dieser wird dadurch durch ein Moment $M_{yy} = M_T$ belastet, welches wiederum Schnittgrößen M_y erzeugt. Der Pfosten erfährt eine Verdrehung φ_y .

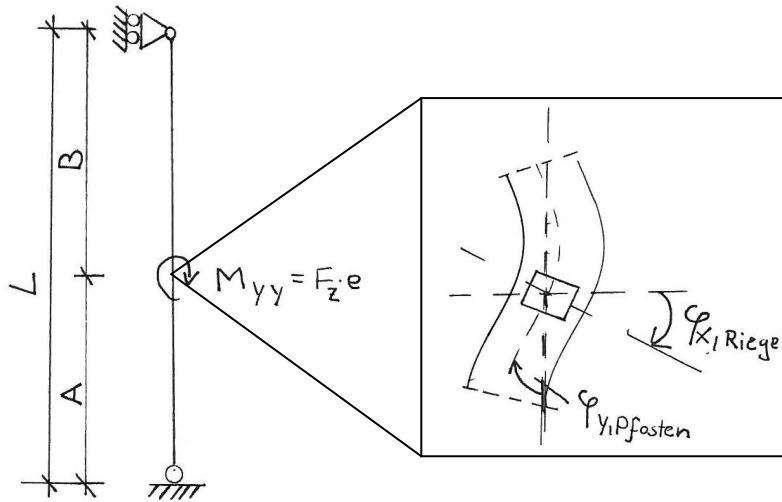


Abbildung 2-17: Statisches System und Verdrehung des Pfostens.

Betrachtet man wiederum den Grenzfall einer torsionssteifen Riegellagerung - es treten also keine gegenseitigen Verdrehungen zwischen Pfosten und Riegel an der T-Verbindung auf - entspricht die Verdrehung des Riegels der Verdrehung des Pfostens an dieser Stelle. Es gilt dann

$$\varphi_{y,\text{Pfosten}}(\xi) = \varphi_{x,\text{Riegel}} \quad (2-11)$$

mit

$$\xi = \frac{A}{L}.$$

Verwendet man wieder das Prinzip der virtuellen Arbeit

$$\varphi_{y,\text{Pfosten}} * E * I_y * \overline{1_{yy}} = \sum_n l_n \int \overline{M_y} * M_y \, dl$$

($\overline{1_{yy}}$ entspricht einem virtuellen Moment, welches an der Stelle ξ angreift)

ergibt sich die Verdrehung des Pfostens im allgemeinen Fall

$$\varphi_{y,\text{Pfosten}}(\xi) = \frac{(A^3 + B^3) * M_{yy}}{3 * L^2 * E I_y} \quad (2-12)$$

und für $A = B$

$$\varphi_{y,\text{Pfosten}}(\xi) = \frac{2 * A^3 * M_{yy}}{3 * L^2 * E I_y} \quad (2-13)$$

Da, wie in Gleichung (2-11) gezeigt, die Verdrehung des Pfostens an dieser Stelle gleich der Verdrehung des Riegels ist, kann der Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverformung des Glasaufagers wie folgt bestimmt werden:

$$f_{z,\text{Pfosten}} = l_g \cdot \tan \varphi_{y,\text{Pfosten}}. \quad (2-14)$$

Oft wird nach der Betrachtung der T-Verbinder die Weiterleitung der Kräfte nicht weiter verfolgt, weil davon ausgegangen wird, dass der Anteil der Pfosten an der Gesamtverformung vernachlässigbar gering ist. Die folgenden Diagramme sollen zeigen, wie groß der Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung ist. Sie wurden für die Annahme, dass ein Riegel an der Stelle $\xi = 0,5$ angreift für die Materialien Stahl, Aluminium und Holz (Festigkeitsklasse C 24) und für verschiedene Pfostenlängen berechnet.

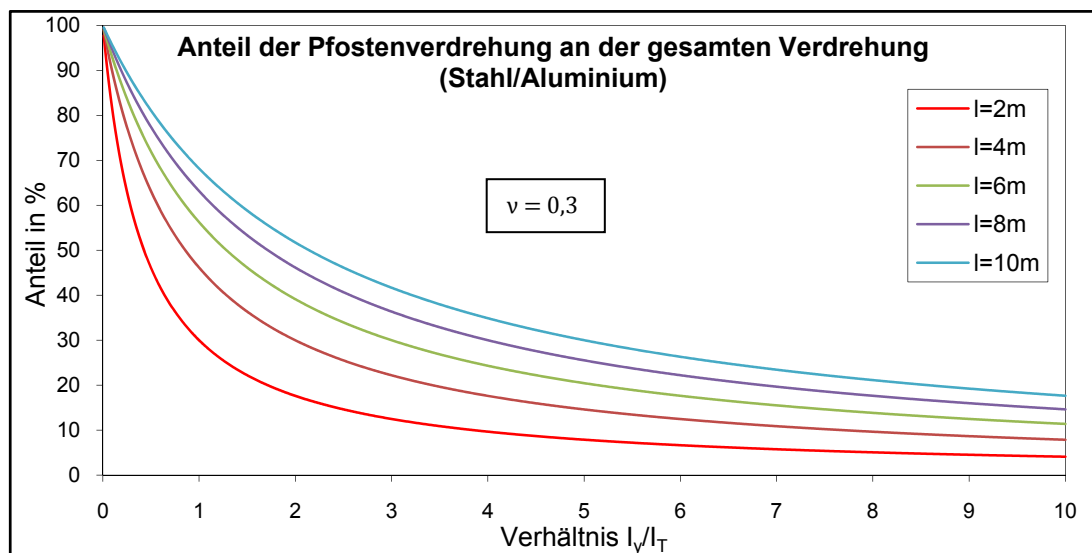


Abbildung 2-18: Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung für Aluminium und Stahl.

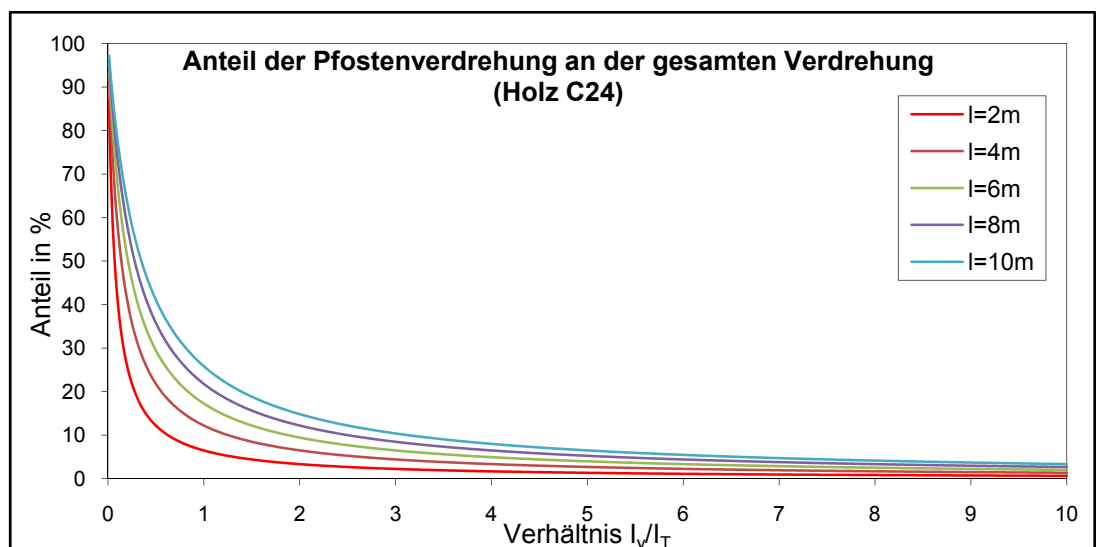


Abbildung 2-19: Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung für Holz.

Der Anteil der Pfosten an der Gesamtverdrehung ist sehr stark von dem Verhältnis des Trägheitsmoments des Pfostens und des Torsionsträgheitsmoments des Riegels I_y/I_T abhängig. Je größer das Trägheitsmoment I_y des Pfostens gegenüber dem Torsionsträgheitsmoment I_T des Pfostens wird, desto geringer wird der Einfluss des Pfostens.

Bei Holzkonstruktionen ist der Anteil der Pfostenverdrehung an der Gesamtverdrehung, unabhängig vom Verhältnis I_y/I_T , geringer als bei Konstruktionen aus Stahl oder Aluminium, da der Schubmodul nur einen Bruchteil des Elastizitätsmoduls ausmacht. Die Verläufe von Aluminium und Stahl sind identisch, da beide dieselbe Querkontraktionszahl und damit auch dasselbe Verhältnis zwischen Elastizitätsmodul und Schubmodul haben. Wie sich die Pfostenverdrehung bei anderen Riegelpositionen verhält, kann aus der nächsten Abbildung entnommen werden.

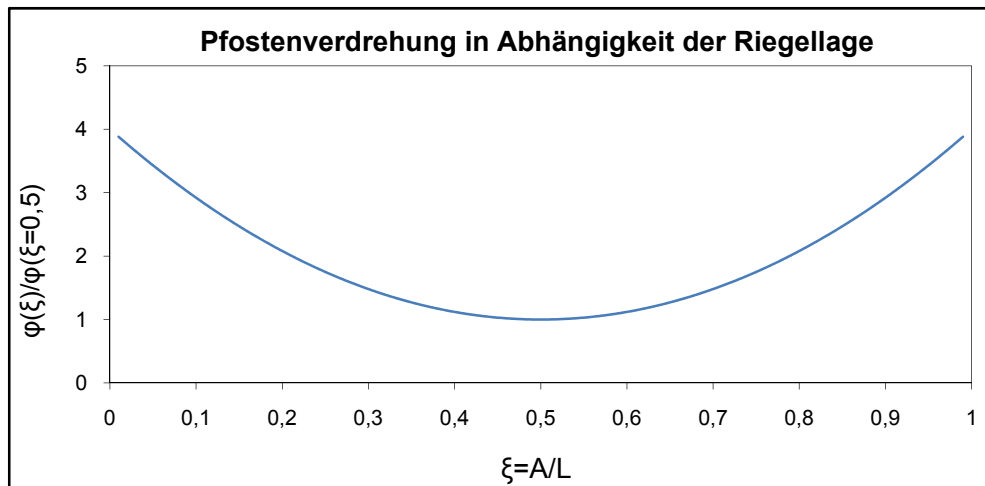


Abbildung 2-20: Pfostenverdrehung in Abhängigkeit der Riegellage.

Die Pfostenverdrehung ist also auch stark von der Lage des Riegels abhängig. Der geringste Wert der Pfostenverdrehung wird bei $\xi = 0,5$ erreicht.

Bei den vorangegangenen Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass die Verhältnisse hier nur für einen Riegel untersucht wurden. Wenn an einem Pfosten mehrere Riegel angreifen, beeinflussen sich diese gegenseitig. Auch der Angriff von anderen externen Lasten, z.B. Windlast und Personenanprall, beeinflusst die Pfostenverdrehung. Eine weitere Rolle spielt das statische System. Wenn man die Fassadenpfosten einspannt oder als Durchlaufträger ausbildet, ändert sich der Verlauf der Biegemomente und damit auch die Pfostenverdrehung über die Pfostenlänge.

Diese Einflüsse können nicht mehr ohne weiteres per Handrechnung ermittelt werden. Die Bestimmung der Pfostenverdrehung sollte aber mit der zurzeit vorhandenen Rechentechnik auch für komplexe Lastfälle schnell zu ermitteln sein.

Um sich ein noch genaueres Bild darüber zu machen, wie sich die Profilwahl auf das System auswirkt, werden nachfolgend einige ausgewählte Querschnittsformen miteinander verglichen.

Tabelle 2-1: Querschnittswerte einiger ausgewählter Querschnitte.

	G [kg/m] ³	I _y [cm ⁴]	I _z [cm ⁴]	I _T [cm ⁴]	I _y /I _T ⁴
QRO 60x4	6,9	45,4	45,4	72,5	0,6
RRO 100x60x3,6	8,53	145	64,8	142	1,0
RRO 120x60x4	10,7	249	83,1	201	1,2
RQ 6/12	4,3	864	216	593	1,5
1/2 IPE 140	6,45	33	22,4	1,22	27,0
IPE 120	10,4	318	27,2	1,74	182,8

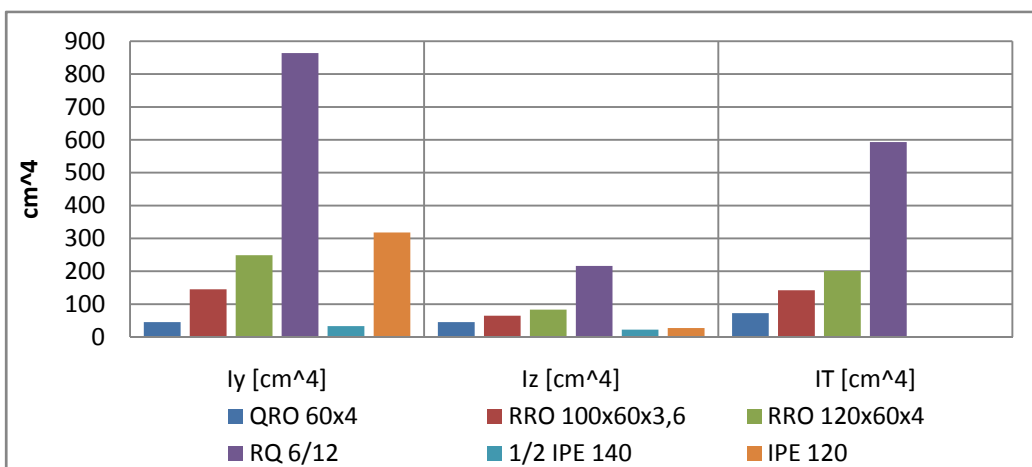


Abbildung 2-21: Vergleich von Querschnittswerten.

Wie man sieht, kann der Einfluss des Pfostens auf die Verformung des Riegels nicht pauschal vernachlässigt werden. Wie schon beschrieben, gilt je größer das Verhältnis von Biegesteifigkeit des Pfostens zur Torsionssteifigkeit des Riegels, desto geringer der Einfluss. Konkret heißt dies, dass bei Konstruktionen aus Holz (wegen des niedrigen Schubmoduls) und aus offenen Profilen ($I_y/I_T \gg 10$) der Pfosteneinfluss in vielen Fällen vernachlässigt werden kann. Der Einfluss auf die Gesamtverdrehung am Glasauflager liegt dann unter 10%.

Riegel aus geschlossenen Profilen weisen aufgrund der hohen Torsionssteifigkeit zwar nur sehr geringe Verdrehungen auf, der Anteil des Pfostens kann aber nahezu 100% der Gesamtverdrehung ausmachen. Zur realitätsnahen Bestimmung der Gesamtverformung am Glasauflager sollte daher bei Konstruktionen mit Riegeln aus geschlossenen Profilen der Einfluss der Pfosten unbedingt berücksichtigt werden!

³ Alle Gewichte für Stahl ermittelt, Ausnahme ist der Vollquerschnitt, bei diesem wurde das Gewicht für Nadelholz C24 ermittelt.

⁴ Für Riegelquerschnitt = Pfostenquerschnitt.

Allgemein kann man aus den vorangegangenen Überlegungen schlussfolgern, dass sich Hohlprofile aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen statischen Werten und Gewicht je Meter besonders gut für Pfosten-Riegel-Konstruktionen eignen (Tabelle 2-1 und Abbildung 2-19).

Bei der Verwendung von Ausfachungselementen aus Isolierglas ist die Horizontalverformung des Pfostens auf $l/200$ maximal 15mm, bezogen auf die Glaskantenlänge, zu begrenzen [27]. Dadurch wird ein Mindestträgheitsmoment für den Pfosten festgelegt. Aufgrund einer Korrelation der rein geometrischen Größen Trägheitsmoment und Torsionsträgheitsmoment wird so indirekt die Verdrehung des Pfostens und damit dessen Anteil an der Riegelverdrehung begrenzt.

Zusammengesetzte Verformung

Es wurde gezeigt, dass die Gesamtverformung an der Glasaufglagerspitze von verschiedenen Systemkomponenten abhängig ist:

- Glasauflager,
- Riegel,
- T-Verbinder,
- Pfosten.

Bei Kenntnis des Verformungsverhaltens jeder Komponente kann man die Verformung und Verdrehung an jeder Stelle der Lasteinleitungsstelle (des Glasaufglagers) durch Addition exakt bestimmen.

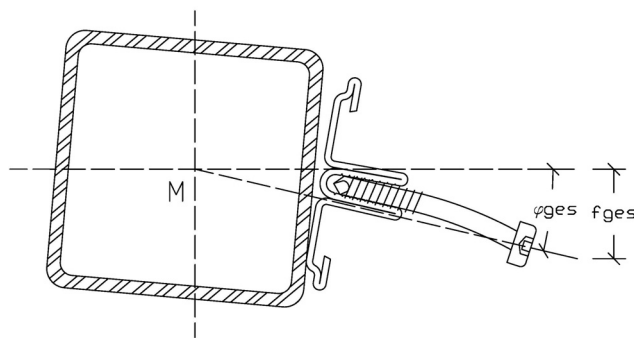


Abbildung 2-22: Zusammengesetzte Verformung.

$$f_{ges} = f_{\text{Glasauflager}} + f_{z,\text{Riegel}} + f_{z,\text{Verbinder}} + f_{z,\text{Pfosten}}$$

(2-15)

Wie die Verformungsanteile bestimmt werden, fasst die nachfolgende Tabelle zusammen:

Tabelle 2-2: Berechnung der Verformungsanteile.

Glasauflager	$f_{z,\text{Glasauflager}} = F * c_{\text{GA}}$	c_{GA} durch Bauteilversuche bestimmen
Riegel	$f_{z,\text{ges,Riegel}} = f_{z,\text{Riegel}} + f_{z,\text{Riegel},\varphi_x}$	$f_{z,\text{Riegel}} = \frac{2 * F_z * a^2 * (\frac{3}{4} * l - a)}{3 * EI_z}$
		$f_{z,\text{Riegel},\varphi_x} = l_g * \tan \varphi_{x,\text{Riegel}}$
		$\varphi_{x,\text{Riegel}} = \frac{F * e * a}{G * I_T}$
Verbinder	$f_{z,\text{Verbinder}} = F * c_v + l_g * \tan[F * e * D]$	c_v durch Bauteilversuche bestimmen
		D durch Bauteilversuche bestimmen
Pfosten	$f_{z,\text{Pfosten}} = l_g * \tan \varphi_{y,\text{Pfosten}}$	$\varphi_{y,\text{Pfosten}} = \frac{(A^3 + B^3) * F * e}{3 * L^2 * EI_y}$

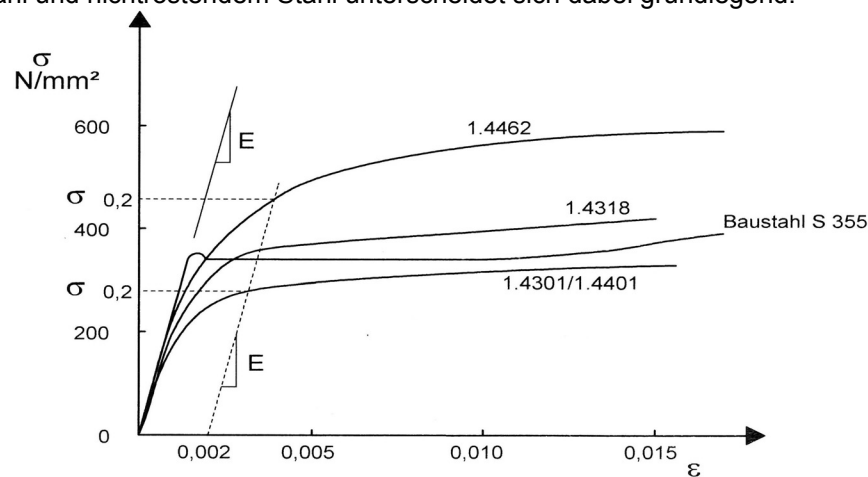
2.2.2 Materialgesetze

Wie in Abschnitt 2.2.1 bei der Betrachtung der Glasauflagerverformung angesprochen, wird das Last-Verformungsverhalten sehr stark vom Materialverhalten der an der Lastabtragung beteiligten Glasauflagerkomponenten beeinflusst. Bei dem betrachteten System *Ferro-Wictec 55-1E* sind die lastabtragenden Teile Glasauflogerschraube und Grundprofil. Eine Mitwirkung des Glasauflagerformstücks kann ausgeschlossen werden. Das Grundprofil besteht aus einem niedriglegierten, bandlegiert verzinkten Kohlenstoffstahl S280GD, die Glasauflogerschraube aus einer austenitischen Chrom-Nickel-Legierung.

Tabelle 2-3: Gegenüberstellung der Materialeigenschaften.

	Grundprofil		Glasauflagerschraube	
Werkstoff	S280GD (bandlegiert verzinkt) ⁵		X 5 Cr Ni 18-10 (A2)	
Werkstoff-Nr.	1.0224		1.4301	
	DIN EN 10326 [3]	Werkszeugnis ⁶	EN ISO 3506-1 [5] AbZ [10]	Werkszeugnis
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	≥ 280	315	210	-
Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	≥ 360	387	500	650 - 750
Bruchdehnung A_{100} [%]	≥ 18	37	≥ 45	≥ 25
Elastizitäts- modul [N/mm ²]	E = 210000		$E_{\text{sek}} = 170000$ (vereinfachte Annahme)	

Die wichtigste Materialkonstante zur Berechnung von Verformungen ist der Elastizitätsmodul, welcher den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der elastischen Verformung eines festen Körpers darstellt. Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Baustahl und nichtrostendem Stahl unterscheidet sich dabei grundlegend.



($\sigma_{0,2}$ ist die 0,2%-Dehngrenze)

Abbildung 2-23: Spannungs-Dehnungskurven für nichtrostenden Stahl und Baustahl [13].

⁵ Handelsname Galfan

⁶ siehe Anhang 03

Baustahl weist bis zur Streckgrenze ein lineares Werkstoffverhalten auf, wenn die Streckgrenze überschritten wird nehmen die Dehnungen überproportional zu. Nach dem Erreichen der Zugfestigkeit bleibt die Spannung schließlich bei immer größer werdenden Dehnungen nahezu gleich, bis eine Bruchdehnung erreicht wird. Die (bei Baustählen geringe) Zunahme der Spannung von der Streckgrenze zur Zugfestigkeit wird Verfestigung genannt. Da die Spannungs-Dehnungskurve mit zwei Geraden angenähert werden kann, dem elastischen Teil mit dem Anstieg E und dem plastischen, nahezu waagrecht verlaufenden Teil, spricht man bei Baustahl von einem linearelastischen-idealplastischen Werkstoffverhalten.

Nichtrostender Stahl zeigt im Gegensatz dazu einen eher gerundeten Kurvenverlauf ohne ausgeprägte Streckgrenze. Deshalb wird bei nichtrostenden Stählen üblicherweise analog zur Streckgrenze als Prüffestigkeit die Spannung definiert, bei welcher 0,2% plastischer Dehnung zurückbleiben. Aufgrund der komplexen Metallurgie hat auch der Verarbeitungsprozess großen Einfluss auf das Materialverhalten. Nichtrostende Stähle weisen deshalb quer zur Walzrichtung andere Materialeigenschaften als längs zur Walzrichtung auf.

Nach Herstellerangaben (vgl. [17]) kann angenommen werden, dass der Werkstoff des Grundprofils die gleichen Eigenschaften wie ein gewöhnlicher Baustahl aufweist. Währenddessen ist der Schraubenwerkstoff 1.4301 (A2) ein nichtrostender Stahl mit entsprechendem nichtlinearem Werkstoffverhalten.

Damit auch bei nichtrostenden Stählen die Verformungen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können, wird der so genannte Sekantenmodul E_{sek} eingeführt. Der Sekantenmodul ist die Steigung einer Gerade vom Beginn bis zu einem beliebigen Punkt auf der Spannungs-Dehnungskurve, daher also abhängig von der Spannung im Bauteil. So ist es möglich die Verformung, welche bei dieser Spannung auftritt, zu berechnen.

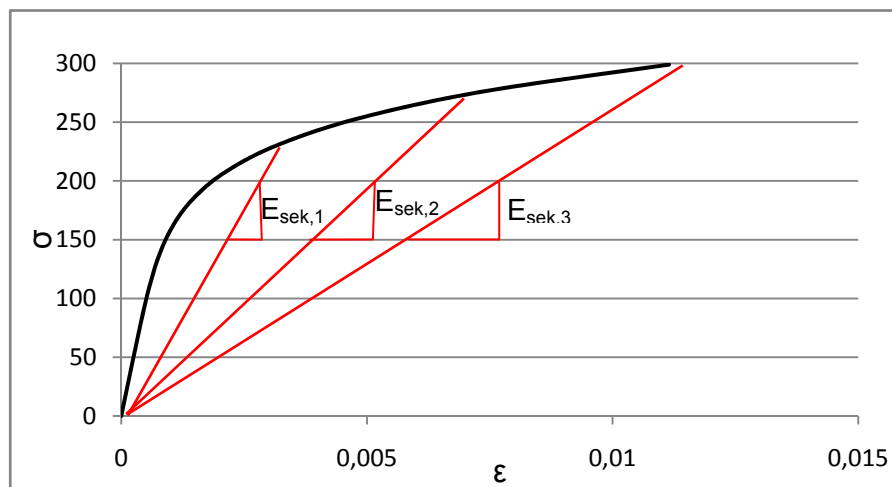


Abbildung 2-24: Definition Sekantenmodul am Beispiel einer ausgewählten Spannungs-Dehnungskennlinie.

Nach [13] kann das Sekantenmodul in einer Querschnittsfaser wie folgt berechnet werden:

$$E_{\text{sek}} = \frac{E_0}{1 + 0,002 \cdot \frac{E_0}{\sigma} \cdot \left(\frac{\sigma}{R_{p0,2}} \right)^n} \quad (2-16)$$

σ ... Spannung in der betrachteten Querschnittsfaser.

Das E-Modul kann über den Querschnitt gemittelt angenommen werden, d.h. es wird das E-Modul an den zwei äußeren Querschnittsfasern bestimmt und das arithmetische Mittel gebildet.

Tabelle 2-4: Konstanten zur Bestimmung des Sekantenmoduls [13].

Stahlsorte	n		E ₀ [N/mm ²]
	Längsrichtung ⁷	Querrichtung	
1.4301 1.4307 1.4541 1.4318	6,0	8,0	200.000
1.4401 1.4404 1.4571	7,0	9,0	
1.4362 1.4462	5,0	5,0	

Da die Spannungen über die Stablänge bei in der Baupraxis vorkommenden Fällen häufig nicht konstant sind, ist auch das Sekantenmodul über die Stablänge variabel. Die Forderung zur Anwendbarkeit des Prinzips der virtuellen Arbeit, dass zumindest abschnittsweise gleiche Steifigkeiten vorliegen, ist nicht mehr gegeben. Eine genaue Berechnung der Verformung für nichtrostende Stähle ist deshalb nur mit Spezialprogrammen, welche komplexe Materialmodelle berücksichtigen können, möglich.

Als Vereinfachung kann nach [13] auf die Variation des Sekantenmoduls über die Stablänge verzichtet werden, wenn der Minimalwert für E_{sek} für den gesamten Stab angesetzt wird. Diese Vereinfachung liefert jedoch deutlich konservative Ergebnisse für die Verformungsberechnung. Für die Berechnung von Schnittgrößen, besonders von Zwangsschnittgrößen wie z.B. aus Temperaturdifferenzen, sind Grenzbetrachtungen mit unterschiedlichen E-Moduln durchzuführen, um die ungünstigste Situation zu bestimmen.

⁷ Bezieht sich auf die Walzrichtung.

2.3 Gebrauchstauglichkeit von Glasauflagern

Wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, gibt es noch keine bauaufsichtlich festgelegten Verformungsgrenzen für Glasauflager. Die Verformung wird von den meisten Systemherstellern auf maximal 1mm begrenzt, was auf eine Bemerkung in den DIBt-Mitteilungen 5/2004 [12] zurückzuführen ist. Dieser Grenzwert hat aber keine theoretischen Grundlagen.

Betrachtet wird die Situation bei Isolierglasscheiben, dem häufigsten Füllungselement bei Pfosten-Riegel-Fassaden. Um Gebrauchstauglichkeitsgrenzen festlegen zu können, muss die Frage beantwortet werden, was passieren kann, wenn sich das Glasauflager zu weit verformt.

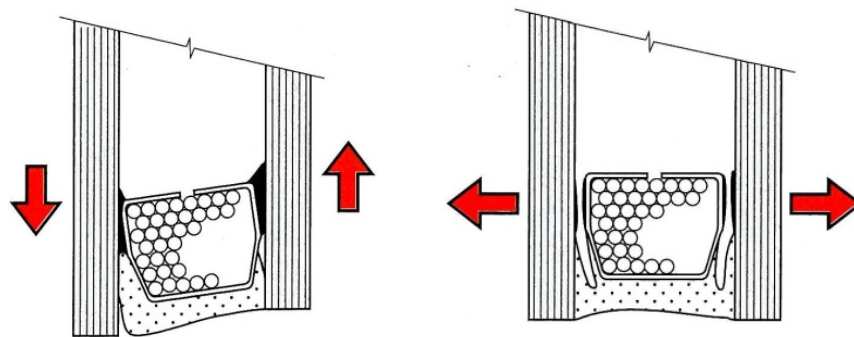


Abbildung 2-25: Belastung des Randverbunds bei Scheibenversatz (links) und Windsog (rechts) [26].

Durch die Verformung des Glasaufagers entsteht ein Versatz zwischen den Scheiben einer Isolierglaseinheit. Da die Scheiben über den Randverbund miteinander gekoppelt sind, kommt es zu einer Scherbelastung des Randverbunds. Zusätzlich dazu muss der Randverbund die Belastungen aus Klima- und Windlasten aufnehmen. Wenn die dadurch im Randverbund entstehenden Spannungen größer als die aufnehmbaren Spannungen werden, wird der Randverbund undicht. Es kommt zum Eindringen von Wasserdampf in den Scheibenzwischenraum und damit zum Funktionsverlust der gesamten Isolierglaseinheit [22].

Der Randverbund besteht bei modernem Isolierglas mit warmer Kante⁸ gem. [6] aus einem Abstandshalter, meist aus Aluminium oder Edelstahl, welcher mit einem Primärdichtstoff auf Butylbasis mit den Scheiben verklebt wird. Als Sekundärdichtung wird meist ein Polysulfidpolymer oder Polyurethan verwendet. Es gibt auch Systeme, bei welchen eine Sekundärdichtung auf der Basis von Silikon verwendet wird.

⁸ Siehe Abschnitt 1.5

Für Dichtsysteme auf der Basis von Silikon besteht prinzipiell die Möglichkeit gemäß [8] sowohl Wind- und Klimalasten als auch das Eigengewicht über den Randverbund abzutragen. Allerdings sind in Deutschland i.d.R. alle Scheiben mechanisch gegen Herabfallen zu sichern, d.h. faktisch wird das Abtragen des Eigengewichts ausgeschlossen.

Für Wind- und Klimabelastungen bei Dichtsystemen auf der Basis von Polysulfid oder Polyurethan gibt [27] eine zulässige Belastung von 0,95 N/mm für Kanten unter Abdeckungen und 0,65 N/mm für freie Kanten an. Eigengewicht darf auch hier nicht über den Randverbund übertragen werden. Es besteht also noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Schubtragfähigkeit des Randverbunds.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Interaktion zwischen Isolierglas, Glasauflager und Glasklotz. Wird ein Teil des Gewichtes der äußeren Scheibe auf die innere übertragen, verschiebt sich der Scheibenschwerpunkt und die Glasauflagerverformung fällt geringer aus. Auch ist das Klotzmaterial durch seine Nachgiebigkeit in der Lage, einen gewissen Scheibenversatz auszugleichen.

Unter welchen Umständen es daher genau zum Ablösen der Scheiben vom Glasklotz kommt, wie sich das Glasauflager unter diesen Umständen verhält und inwiefern sich dies dann auf den Randverbund und die Auflagerpressung der Scheibe auswirkt, muss noch geklärt werden. Eine Hilfe wären rechnergestützte Variantenstudien, welche durch Versuchsergebnisse verifiziert werden.

Wenn sich das Glasauflager so weit verformt, dass ein Teil der äußeren Scheibe nicht mehr vom Glasklotz unterstützt wird und der Randverbund das Gewicht der äußeren Scheibe auf die innere Scheibe überträgt, kann es unter Umständen auch zu einer lokalen Überbeanspruchung des Glases und damit zum Glasbruch kommen (vgl. [11] und [22]). Für das zusätzliche Gewicht der äußeren Scheibe steht nur die Aufstandsfläche der inneren Scheiben zur Verfügung. Forschungsergebnisse darüber, wie groß die Auflagerpressung für Glasscheiben sein darf, stehen noch nicht zur Verfügung.

Auch der Glasklotz erfährt bei einer Verlagerung des Glasgewichts eine erhöhte Druckbeanspruchung. Nach [11] sind Formänderungen, welche sich aus der Klotzbelastung ergeben und zu einem Funktionsverlust des Glasklotzes führen, auszuschließen.

Die Pressung des Klotzes ergibt sich nach prEN ISO 14439 [7] zu

$$\sigma = 25 * A * \frac{v}{a * n * l} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2-17)$$

wobei

A... Fläche der Verglasungseinheit in [m²]

v... Summe der Scheibendicken innerhalb der Verglasungseinheit in [mm]

a... Gesamtglasdicke der Scheiben innerhalb der Verglasungseinheit, welche auf der Klotzfläche aufstehen in [mm]

n... Anzahl der Tragklötze

l... Länge eines Tragklotzes.

Zu der zulässigen Flächenpressung auf den Glasklotz findet man in der Literatur stark variierende Werte. Sie ist laut [7] gleich der zulässigen Spannung des Klotzwerkstoffes anzunehmen, darf aber $1,5\text{N/mm}^2$ nicht überschreiten, was offensichtlich deutlich konservativ ist. Nach [11] dürfen pauschal 5N/mm^2 als zulässige Flächenpressung angesetzt werden, wobei der Nachweis der Druckfestigkeit vom Klotzhersteller zu erbringen ist.

Um die Dauergebrauchstauglichkeit der Fassade zu gewährleisten, ist auch sicherzustellen, dass es durch die Verformung des Glasauflegers nicht zum Kontakt von diesem mit der darunter liegenden Isolierglaseinheit kommt. Dabei zu berücksichtigen sind die möglichen Toleranzen der Isolierglaseinheit. Weiterhin darf der Dampfdruckausgleich im Falzraum durch übermäßige Glasauflegerverformungen nicht behindert werden. Wie hoch der Falzraum ist, variiert nach verwendetem Fassadensystem, der Ansichtsbreite und damit der Breite des Fassadenprofils sowie nach gewähltem Glaseinstand.

Im betrachteten Fall des Glasauflegers für das Fassadensystem *esco Ferro-Wictec 55-1E* beträgt die Höhe des Falzraums unter dem Glasaufleger 5mm. Unter Berücksichtigung der maximalen Toleranzen der Glastafeln von $\pm 3,0\text{mm}$ in Standardfällen und bis zu $\pm 4\text{mm}$ bei Sonderanfertigungen (siehe [18], [24] und [27]), sowie unter Annahme eines ausreichend steifen Riegels (vgl. Abschnitt 2.2.1) kann gesagt werden, dass in diesem Fall eine **Gesamtdurchbiegung des Glasauflegers von $f_{\max}=1\text{mm}$** ein realistisches Gebrauchstauglichkeitskriterium darstellt. Für andere Ansichtsbreiten und Fassadensysteme ist diese Annahme zu überprüfen und schließt außerdem keine Aussagen über die Tragfähigkeit des Randverbundes mit ein.

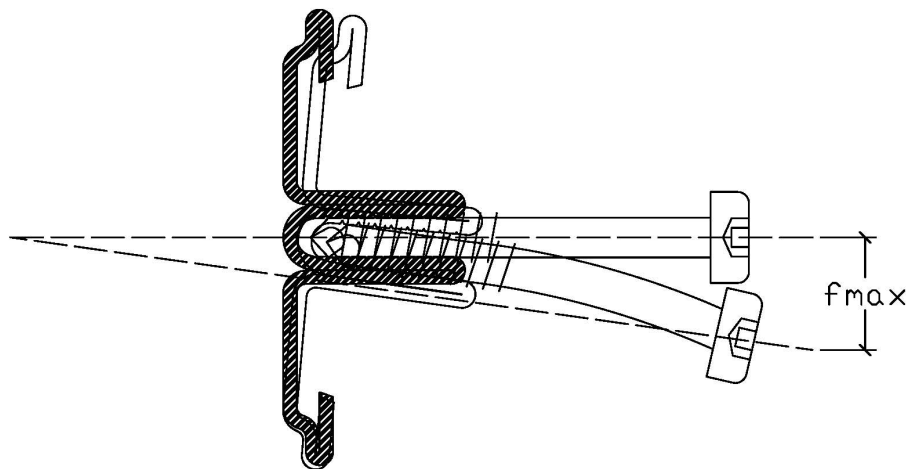


Abbildung 2-26: Definition des Gebrauchstauglichkeitskriteriums für Aufsatzfassadensystem Ferro-Wictec 55-1E.

Die vorangegangenen Überlegungen machen deutlich, dass es aufgrund der starken Abhängigkeit vom verwendeten Fassadensystem und dem Aufbau der Isolierglaseinheit gar nicht möglich ist, pauschale Festlegungen bezüglich einer Verformungsbegrenzung zu machen. Die Hersteller der Fassadensysteme sind hier in der Pflicht, geeignete Mittel zur Verformungsermittlung zur Verfügung zu stellen, Hersteller von Isolierglas sollten Angaben über die ertragbaren Schubbelastungen ihres Randverbundsystems machen. So kann im Einzelfall die Zulässigkeit auftretender Verformungen überprüft werden.

2.4 Zusammenfassung

Die Gesamtverformung am Glasaufleger ist von verschiedenen additiven Komponenten abhängig. Dabei lassen sich vom statischen System der Unterkonstruktion abhängige Komponenten und von der Konstruktion des Glasauflegers abhängige Komponenten unterscheiden. Von der Unterkonstruktion abhängige Komponenten sind:

- Riegel
- T-Verbinder
- Pfosten.

Bei Kenntnis einiger Randbedingungen, wie z.B. Lage der Glasaufleger am Riegel, Abstand des Schwerpunkts der Füllung vom Schubmittelpunkt des Riegelprofils, Kennwerte der T-Verbindung und Auflagerbedingungen des Pfostens, kann man diese Komponenten mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Baustatik ausreichend genau berücksichtigen.

Die Verformung des Glasauflegers als vom statischen System der Unterkonstruktion unabhängige Komponente ist wiederum eine zusammengesetzte Größe. Die einzelnen Komponenten unterscheiden sich stark nach verwendetem Fassadensystem. Für das betrachtete System *Ferro-Wictec 55-1 E* setzt sich die Verformung aus folgenden Komponenten zusammen:

- Verformung der Schraube
- Verformung (Aufbiegen) des Schraubkanals
- Verformung (Verdrehung) des Grundprofils
- Steifigkeit und Anordnung der Verbindungen zwischen Grundprofil und Unterkonstruktion.

Wie sich die einzelnen Komponenten bei Belastung verhalten kann aufgrund des komplexen Tragverhaltens nur durch Bauteilversuche hinreichend genau geklärt werden. Die zusammengesetzte Tragwirkung kann mit anhand dieser Versuche kalibrierter Finite-Elemente-Modelle untersucht werden.

Mit Hilfe dieser Modelle und weiterer Bauteilversuche muss auch die Interaktion zwischen Glasaufleger, Glasklotz und Randverbund des Isolierglases untersucht werden, um realitätsnahe Verformungsgrenzen festlegen zu können.

Weitere Erkenntnisse:

- Durch die Verformungsbegrenzung in der Produktnorm für Vorhangfassaden [9] bezüglich des Riegelprofils wird auch indirekt durch eine gewisse Korrelation geometrischer Eigenschaften die Riegelverdrehung begrenzt.
- Die oft vernachlässigten Auswirkungen der Pfostenverformung auf die Riegelverdrehung ist bei vielen Systemen mit zu berücksichtigen, Ausnahmen bilden Systeme, bei denen das Verhältnis zwischen dem Pfostenträgheitsmoment und dem Torsionsträgheitsmoment $I_y/I_T > 10$ ist und bei Konstruktionen aus Holz, da in diesen Fällen der Einfluss des Pfostens $< 10\%$ beträgt.
- Bei Systemen mit mehreren Riegeln und einer Belastung durch externe Kräfte ist die Pfostenverdrehung nur mittels Rechenprogrammen wirtschaftlich zu bestimmen.
- Aufgrund des guten Verhältnisses zwischen Gewicht, Torsionsträgheitsmoment und Hauptträgheitsmomenten eignen sich geschlossene Profile besonders gut zur Konstruktion von Pfosten-Riegel-Fassaden.
- Für das Glasauflager des Stahl-Aufsatzfassadensystems *esco Ferro-Wictec 55-1E* kann gesagt werden, dass ohne genaue Kenntnis der Konstruktionsdetails und Toleranzen eine **maximal zulässige Gesamtverformung** (inklusive Riegelverformung) des Glasaufagers von **$f_{\max} = 1\text{mm}$** ein realistisches Kriterium darstellt. Dieser Wert kann nicht pauschal auf andere Ansichtsbreiten und Fassadensysteme übertragen werden. Ist der Riegel ausreichend Biege- und torsionssteif, darf sich das Glasauflager allein 1mm verformen.

3 Versuchsbestimmte Verformung der Glasauflager

3.1 Einführung und Strategie

Im versuchstechnischen Teil dieser Arbeit wird das Last-Verformungsverhalten des Glasaufagers des Stahlaufsatz-Pfosten-Riegel-Fassadensystems *Ferro-Wictec 55-1 E* untersucht. Dies geschieht mit einer auch bei der Firma esco gebräuchlichen und bewährten Versuchskonstruktion, welche für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche etwas modifiziert wurde.

Ein Ziel der Bauteilversuche ist, den Anteil der im Kapitel 2 beschriebenen Komponenten Länge und Achsabstand der Glasaufagerschrauben, federnde Einspannung durch den Schraubkanal und Verdrehung des Grundprofils an der Gesamtverformung zu quantifizieren. Es soll festgestellt werden, ob und an welcher Stelle des Glasaufagers im betrachteten Wertebereich plastische Verformungen auftreten.

Weiterhin soll die Kraft, welche nötig ist, die untersuchten Glasauflagervarianten um 1mm zu verformen, ermittelt werden und mit den vom Systemhersteller angegebenen zulässigen Lasten verglichen werden.

Da sich bei dem Versuchsprogramm eng an die Verarbeitungsrichtlinien des Herstellers gehalten wurde, können auch die verschiedenen von diesem vorgesehenen Konstruktionsvarianten beurteilt werden.

Die Versuche wurden an einem gedanklich aus der Fassade herausgeschnittenen Riegel mit Pfostenstummeln durchgeführt. Über ein Stahlschwert wurde eine auf den nach den Herstellerangaben angebrachten Glasaufagern stehende Scheibe simuliert. Dabei wurden sowohl die aufgebrachten Kräfte (das simulierte Glasgewicht) als auch die auftretenden Verformungen gemessen.

Durch gezielte Variation jeweils eines Einflussfaktors, während andere konstant gehalten werden, kann dieser aus der Gesamttragwirkung extrahiert werden. Dazu werden Vergleiche zu Versuchen angestellt, bei denen dieser Einflussfaktor konstant gehalten wird und andere variiert werden. So können Rückschlüsse auf den jeweiligen Anteil an der Gesamttragwirkung gezogen werden.

3.2 Übersicht über das Versuchsprogramm

Durch die vielfältigen Varianten, das Grundprofil an der Unterkonstruktion zu befestigen, das Glasauflager auszubilden und vor allem durch die vielen möglichen Füllungsdicken existiert eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Um den Umfang der Versuche auf ein durchführbares Maß zu reduzieren, werden nur einige sinnvolle Faktoren variiert, andere bei allen Versuchen gleich gehalten. Nachfolgend werden veränderliche Einflussfaktoren als „variabel“ bezeichnet, nicht veränderliche als „konstant“.

Tabelle 3-1: Konstante und variable Einflussfaktoren.

konstant	variabel
<ul style="list-style-type: none"> - Aufsatzsystem Ferro-Wictec 55-1 E - Abmaße und Wandstärke des Prüfkörpers - Lagerungsbedingungen des Prüfkörpers - Lage der Glasauflager am Riegel - Material des Prüfkörpers (S235JR) - Material des Aufsatzprofils (S280GD nach EN 10326, Werkstoffnummer 1.0244, bandlegiert verzinkt, Handelsname: Galfan) - Länge und Lage des Aufsatzprofils - Verbindung Aufsatzprofil-Unterkonstruktion mittels Lochschweißung - Befestigung des Glasauflagers mit Glasauflagerschrauben 	<ul style="list-style-type: none"> - Füllungsdicke (40mm; 50mm) - Anzahl der Glasauflagerschrauben je Glasauflager (n = 2,3,5) - Befestigung ohne und mit zusätzlicher Lochschweißung gemäß Angaben Verarbeitungsrichtlinien [17]

Zur besseren Übersicht wurden drei Versuchsserien gebildet, gegliedert in die Serien A, B und C. Die Serienbezeichnung findet sich auch in der Versuchsnummerierung und in der Ergebnisauswertung wieder. Es folgt eine Beschreibung der Versuchsserien.

Serie A: Grundlagenuntersuchungen

Kalibriermessungen. Ziel der Versuche der Serie A war, geeignete Versuchsbedingungen für die folgenden Versuche zu finden, zu klären, ob ein Glasklotz einen Einfluss auf das Versuchsergebnis hat und wenn ja, wie groß dieser ist. Weiterhin wurden die Messgeräte kalibriert und Erfahrungen den vorkommenden Schlupf betreffend gewonnen.

Serie B: Untersuchungen an Proben ohne zusätzlichen Schweißpunkt

Bei den Untersuchungen der Serie B wurden die Parameter Füllungsdicke und Schraubenanzahl variiert. So konnten Erkenntnisse über die Beeinflussung der Schrauben

untereinander bzw. die Auswirkungen eines geringen Schraubenabstandes auf die Biegung des Schraubkanals und über den Einfluss steigender Exzentrizität durch eine größer werdende Füllungsdicke gewonnen werden. Es erfolgten in geeigneten Abständen Zwischenentlastungen um den Beginn einer Plastizierung und die Größenordnung der plastischen Verformung besser abschätzen zu können.

Serie C: Untersuchungen an Proben mit zusätzlichem Schweißpunkt

In dieser Versuchsreihe wurde das gleiche Spektrum an Einflussfaktoren wie in Serie B betrachtet, der Unterschied besteht in der zusätzlichen Lochschweißung mit einem Durchmesser von 8mm mittig über dem Glasaufleger. Diese Lochschweißung wurde nach den Verarbeitungsrichtlinien [17] angebracht. Im Vergleich mit den Ergebnissen aus Serie B kann der Einfluss der Lochschweißung und damit des Grundprofils auf das Last-Verformungsverhalten bestimmt werden.

Tabelle 3-2: Übersicht über die Versuche.

Versuchs- bezeichnung	Bezeichnung Probekörper ⁹	Glasklotz	Breite Glasklotz [mm]	Füllungs- dicke [mm]	Schrauben- anzahl je Glasaufleger	zusätzlicher Schweißpunkt	Zweck der Versuche
A1	1v	nein	-	40	2	nein	Kalibrierung
A2	1v	nein	-	40	2	nein	Kalibrierung
A3	1h	nein	-	40	2	nein	Kalibrierung
A4	1h	ja	40	40	2	nein	Kalibrierung, Einfluss Klotz
A5	1h	ja	50	40	2	nein	Kalibrierung, Einfluss Klotz
A6	1h	ja	50	40	2	nein	Kalibrierung, Einfluss Klotz
A7	-	-	-	-	-	-	Kalibrierung Messgeräte
A8	-	-	-	-	-	-	Kalibrierung Messgeräte
B1	1v	nein	-	40	2	nein	Einfluss Schraubenabstand
B2	2h	nein	-	40	3	nein	Einfluss Schraubenabstand
B3	3h	nein	-	40	5	nein	Einfluss Schraubenabstand
B4	3v	nein	-	50	2	nein	Einfluss Füllungsdicke
B5	2v	nein	-	50	3	nein	Einfluss Füllungsdicke
B6	3h	nein	-	50	5	nein	Einfluss Füllungsdicke
C1	2v	nein	-	40	2	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung
C2	3v	nein	-	40	3	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung
C3	3h	nein	-	40	5	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung
C4	2h	nein	-	50	2	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung
C5	1v	nein	-	50	3	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung
C6	1h	nein	-	50	5	ja	Einfluss Grundprofilverdrehung

⁹ Eine Erklärung der Bezeichnungen ist in Abschnitt 3.3 zu finden.

3.3 Beschreibung der Probekörper

Die Versuchskörper wurden aus warmgefertigten Quadratrohrprofilen QRO 60x3 S235JR hergestellt. Die Höhe der Probekörper betrug 300 mm, die Gesamtbreite 1310 mm, was einer Riegellänge von 1190 mm entspricht. Der Riegel wurde mit den Pfosten über eine Kehlnaht mit einer Dicke von $a = 3\text{ mm}$ an den Flanschseiten verbunden, die Stegseiten der Rohrprofile wurden freigelassen. Insgesamt wurden 3 baugleiche Versuchskörper gefertigt.

Auf die so hergestellten Fassadenausschnitte wurden die Aufsatzgrundprofile mittels Lochschweißung gemäß den Herstellerangaben aufgebracht. Da die zur Verfügung stehende Menge an Versuchsmaterialien begrenzt war, wurden je nur 300mm lange Grundprofilstücke aus dem Stangenmaterial geschnitten. Damit bei jedem Probekörper die Lage der Grundprofilendstücke gleich ist und außerdem gewährleistet werden konnte, dass alle Endstücke in Waage sind, wurden zur Montage Schweißlehren verwendet. Bedingt dadurch sitzen die Grundprofilendstücke nicht mittig auf dem Riegelprofil, sondern sitzen bündig an der Unterkante. Dies hatte aber keinerlei Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse.

Danach wurden auf Länge geschnittene Dichtungsstücke auf die Grundprofile gesetzt und die Glasauflager aufgesteckt und verschraubt. Auch hier wurde zum definierten Herstellen der Lage eine Lehre verwendet. Die Lage der Glasaufлагerschrauben wird durch die in das Glasauflager integrierten Schraubkanäle definiert.

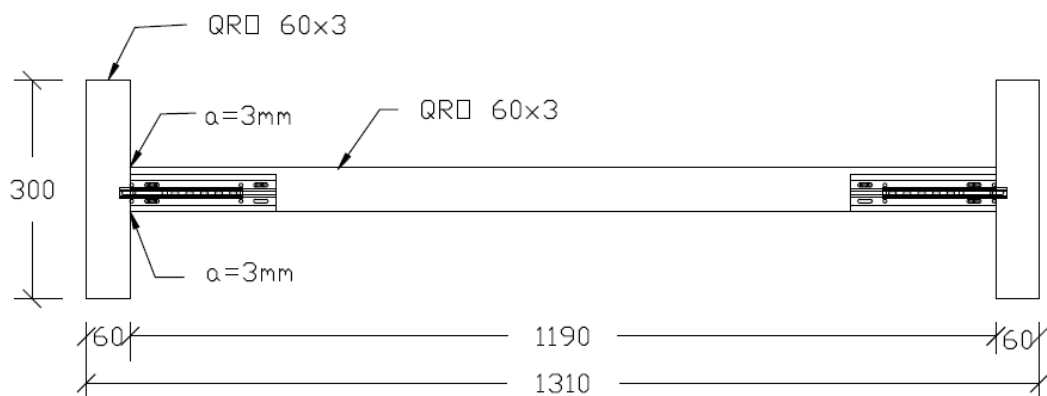


Abbildung 3-1: Abmaße Probekörper (Darstellung ohne Dichtungen).



Abbildung 3-2: Fertigung der Prüfkörper mit Lehren.

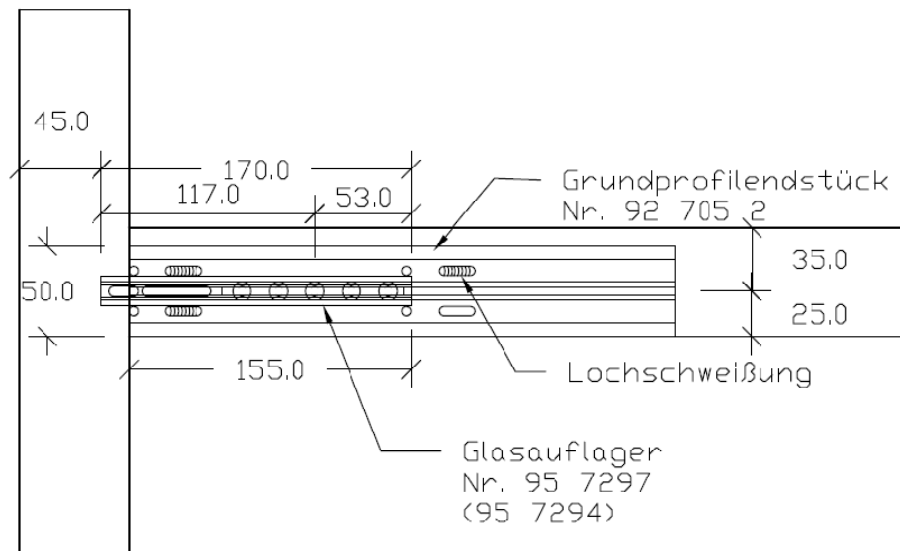


Abbildung 3-3: Detail Glasaufleger linke Seite (Darstellung ohne Dichtung).

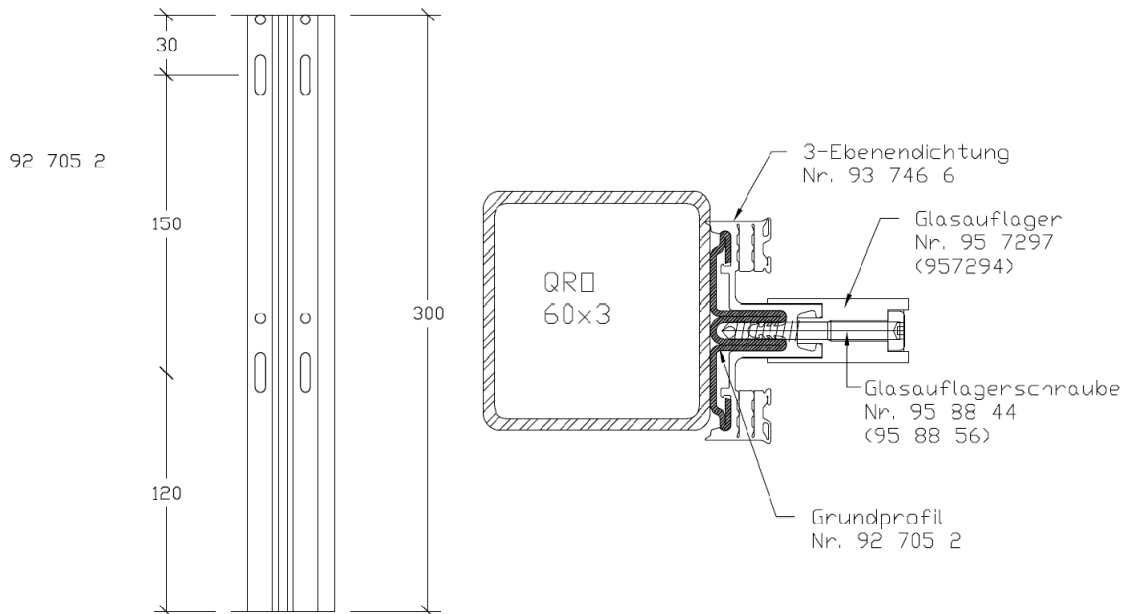


Abbildung 3-4: Linke Seite: Detail Glasauflegerendstück. Rechte Seite: Schnitt durch Glasaufleger.

Tabelle 3-3: Übersicht über die Artikelnummern (aus [16]).

Artikelnummer	Teil	Länge (Tiefe)	Füllungsdicke	Material
93 746 6	3-Ebenendichtung	16mm	alle	Gummi, vulkanisiert
95 7294	Glasauflager	37,5mm	40mm	Kunststoff
95 7297	Glasauflager	49,5mm	50mm	Kunststoff
95 88 44	Glasauflagerschraube	44mm	40mm	X5CrNi 18-10 (A2) Werkstoffnummer: 1.4301
95 88 56	Glasauflagerschraube	56mm	50mm	X5CrNi 18-10 (A2)
92 705 2	Grundprofil	-	alle	S280GD Werkstoffnummer: 1.0244

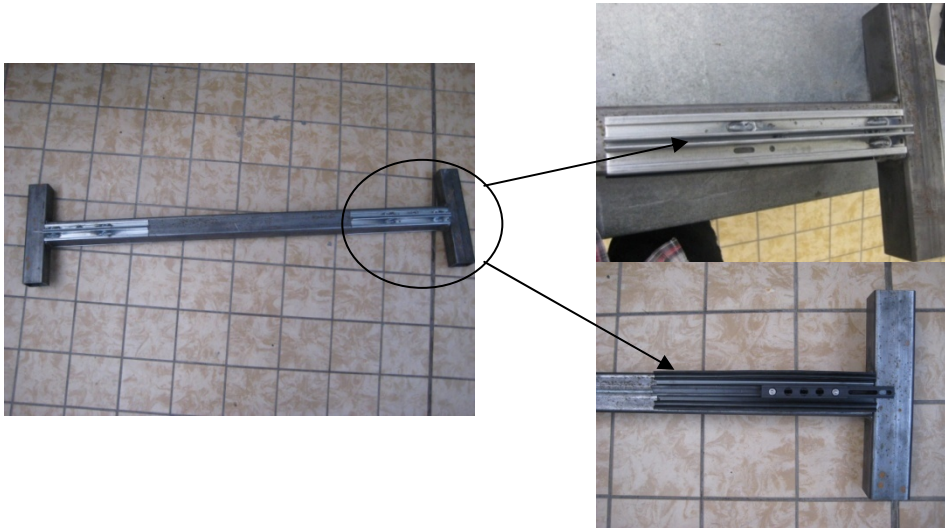


Abbildung 3-5: Prüfkörper ohne (oben rechts) und mit (unten rechts) Dichtung und Glasauflager.

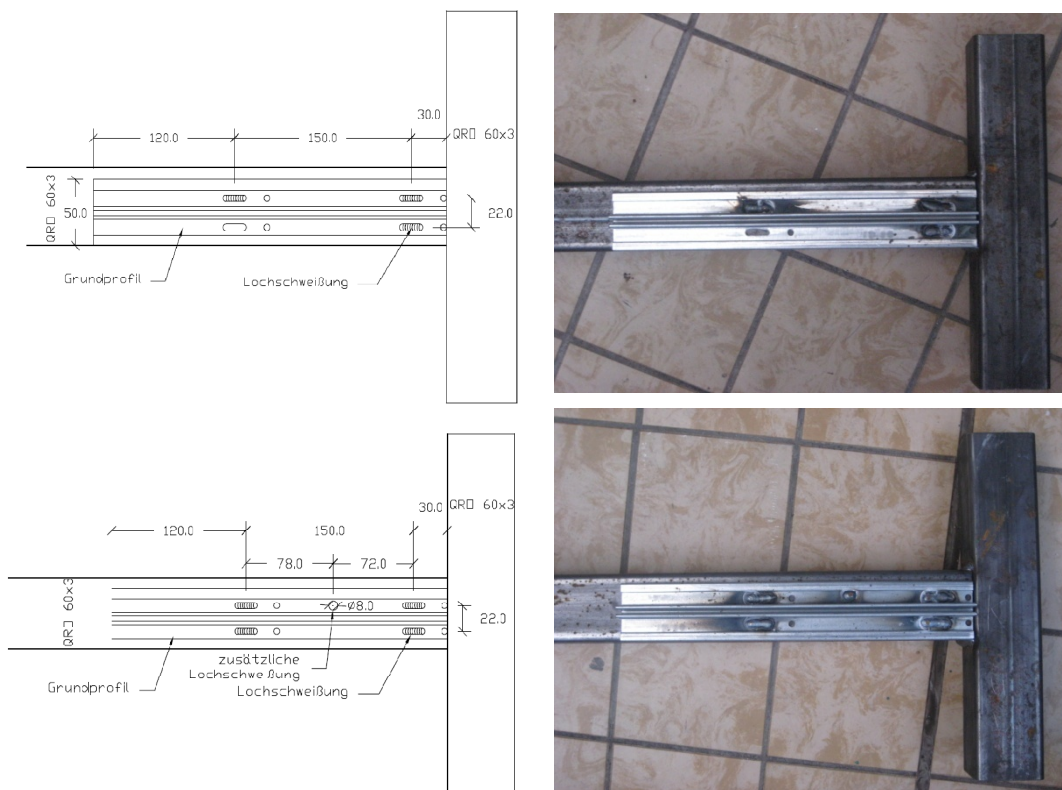


Abbildung 3-6: Oben: Verbindung Grundprofil ohne zusätzlichen Schweißpunkt (Serien A und B). Unten: Verbindung Grundprofil mit zusätzlicher Lochschweißung (Serie C).

Um eine bessere Handhabbarkeit bei den Versuchen zu erzielen, wurden die Grundprofilendstücke immer beidseitig (hinten und vorn) auf die Probekörper aufgebracht. So konnte der Prüfkörper für einen erneuten Versuchsdurchlauf ohne große Umbauten wieder verwendet werden, wenn er 180° um die Pfostenachse gedreht wurde.

Damit die Messwerte nachvollziehbar blieben, wurde den Prüfkörpern und den Seiten jeweils eine eindeutige Bezeichnung zugewiesen und diese dann auch in die Versuchsbezeichnung aufgenommen. Die Prüfkörper erhielten die Nummern 1 bis 3, die Seiten die Bezeichnung „v“ und „h“. Der Bezeichnung „A1 1v“ lässt sich also entnehmen, dass der erste Versuch der Serie A an der Seite „v“ des Prüfkörpers „1“ durchgeführt wurde. Damit eine Verwechslung ausgeschlossen wird, wurden die Bezeichnungen in die Prüfkörper eingeprägt. Ausgeschlossen werden sollte auch das Vertauschen von oben und unten, also eine Drehung von 180° um die Riegelachse, deshalb wurden zusätzlich die Pfostenenden eindeutig gekennzeichnet.

Nach jedem Versuch der Serien B und C musste das Grundprofil komplett ausgetauscht werden. Grund dafür war unter anderem die plastische Verformung in einzelnen Bauteilen, welche eine Verfälschung der Messergebnisse durch unplanmäßige Vorverformung und eine Verfestigung des Materials verursacht hätte. Selbst wenn im Schraubkanal des Grundprofils keine Schädigungen festzustellen waren, konnten die Schrauben nicht durch neue ersetzt werden. Die Glasaufлагerschrauben sind gewindefurchend und eine an gleicher Stelle eingebrachte Schraube hätte nicht denselben Halt im Schraubkanal.

3.4 Versuchsaufbau und Durchführung

3.4.1 Serie B und Serie C

Zur Durchführung der Versuche wurden die Probekörper in eine von der Fa. esco schon vorher für Versuche genutzte Aufnahme gespannt. Diese besteht aus einem HEA 180 mit der Länge von 1500mm. Auf diesem ist an jeder Seite eine Führung bestehend aus einem senkrecht stehenden Flachstahl und einem daran angeschweißten Rechteckrohr angebracht. Zwischen diese Aufnahmen kann der Prüfkörper mit geringen Toleranzen eingeschoben und dann fixiert werden.



Abbildung 3-7: Aufnahme ohne (links) und mit (rechts) Prüfkörper.

Diese Aufnahme wurde in einen Prüfstand eingespannt, die Lastaufbringung erfolgte über einen Hydraulikzylinder (Yale YH – 10/150) mit manuell betriebener Pumpe und einem Stahlschwert mit an der Unterkante angeschweißtem Quadratrohr 40x3 zur Lastverteilung. Mit diesem Stahlschwert sollen Füllungsdicke und Füllungsgewicht simuliert werden. Die aufgebrachte Kraft wurde über eine Kraftmessdose (HBM U93/20kN) mit einem Messbereich bis 20kN gemessen. Die Aufnahme für die Kraftmessdose wurde mit einem auf den Prüfzylinder aufgeschraubten Flansch mit einer eingedrehten Zentrierung und vier gleichmäßig vorgespannten Gewindestangen M5, welche das Stahlschwert halten, realisiert.

Um die verschiedenen Füllungsdicken zu simulieren, wurde ein Aufsatz aus einem Quadratrohr 50x3 benutzt, welcher über eine Klemmverbindung auf das Stahlschwert aufgesetzt werden konnte.

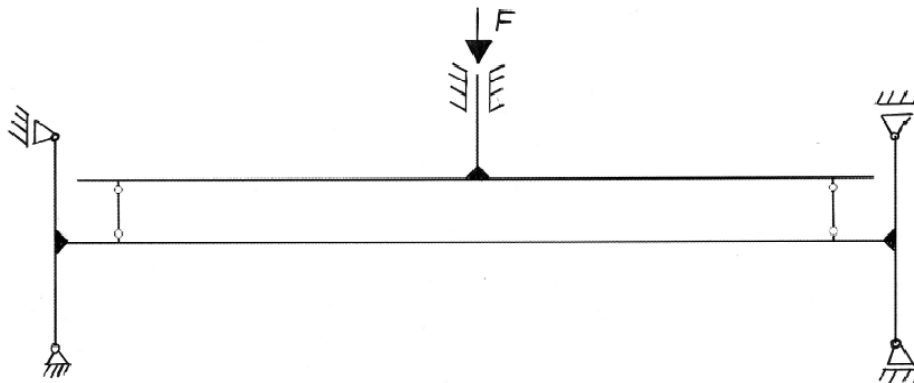


Abbildung 3-8: Statisches System der Versuche.

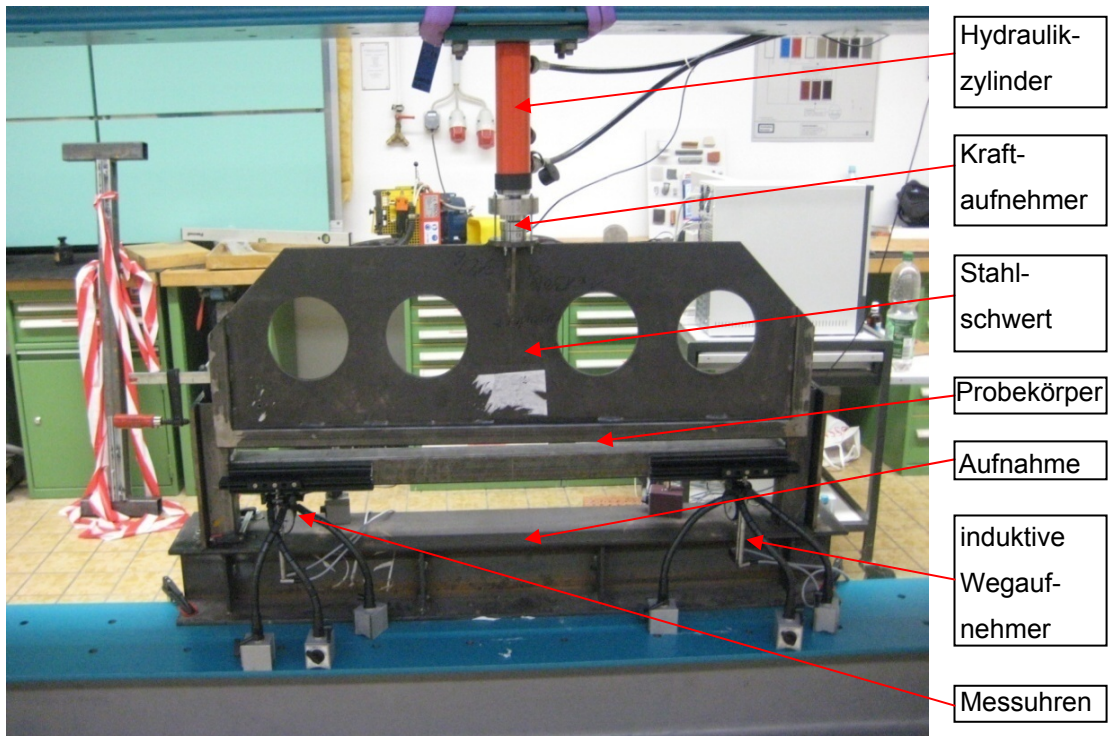


Abbildung 3-9: Versuchsaufbau.

Die Verformungen der Glasaufleger wurden auf jeder Seite mit je vier Aufnehmern gemessen. Die Verformungen des Glasauflegers wurden mit zwei induktiven Wegrastern vom Typ *HBM WA20* (20mm Nennmessbereich) erfasst, die Verformung am Riegel mit je zwei analogen Messuhren mit einem Messbereich von 20mm und einer Skalenteilung von 0,01mm (Fabrikat *Mitutoyo*). Die Wegtaster unter dem Riegelprofil dienen dazu, den Einfluss der Riegelverdrehung und -verformung auf die Gesamtverformung zu ermitteln und die Ergebnisse gegebenenfalls von diesem Einfluss zu bereinigen (siehe Abschnitt 4.5.1). Der Grund für die Verwendung von analogen Messuhren unter dem Riegelprofil ist, dass induktive Wegtaster aufgrund ihrer Länge nicht zwischen Riegelprofil und Aufnahme gepasst haben. Gemessen wurde immer unter der mittleren Bohrung des Glasauflegerformstücks, welches in der Abbildung 4-3 vermaßt ist. Alle Aufnehmer befinden sich in einer Reihe hintereinander.

Zur besseren Unterscheidung der Messstellen wurden für jedes Glasaufleger die Aufnehmer nummeriert. Da ein Vertauschen der Seiten der Probekörper aufgrund der unter Abschnitt 4.1 beschriebenen Maßnahmen ausgeschlossen war, wurde den Wegaufnehmern zusätzlich die Bezeichnung „l“ für „links“ und „r“ für „rechts“ gegeben, wobei sich die Seitenbezeichnungen links und rechts immer auf die Ansicht von vorn beziehen. Der Messstellenbezeichnung „W2l“ kann man demnach entnehmen, dass es sich um den Wegaufnehmer „W2“ auf der linken Seite handelt. Mehr über die Verteilung der Wegtaster ist Abbildung 4-10 zu entnehmen.

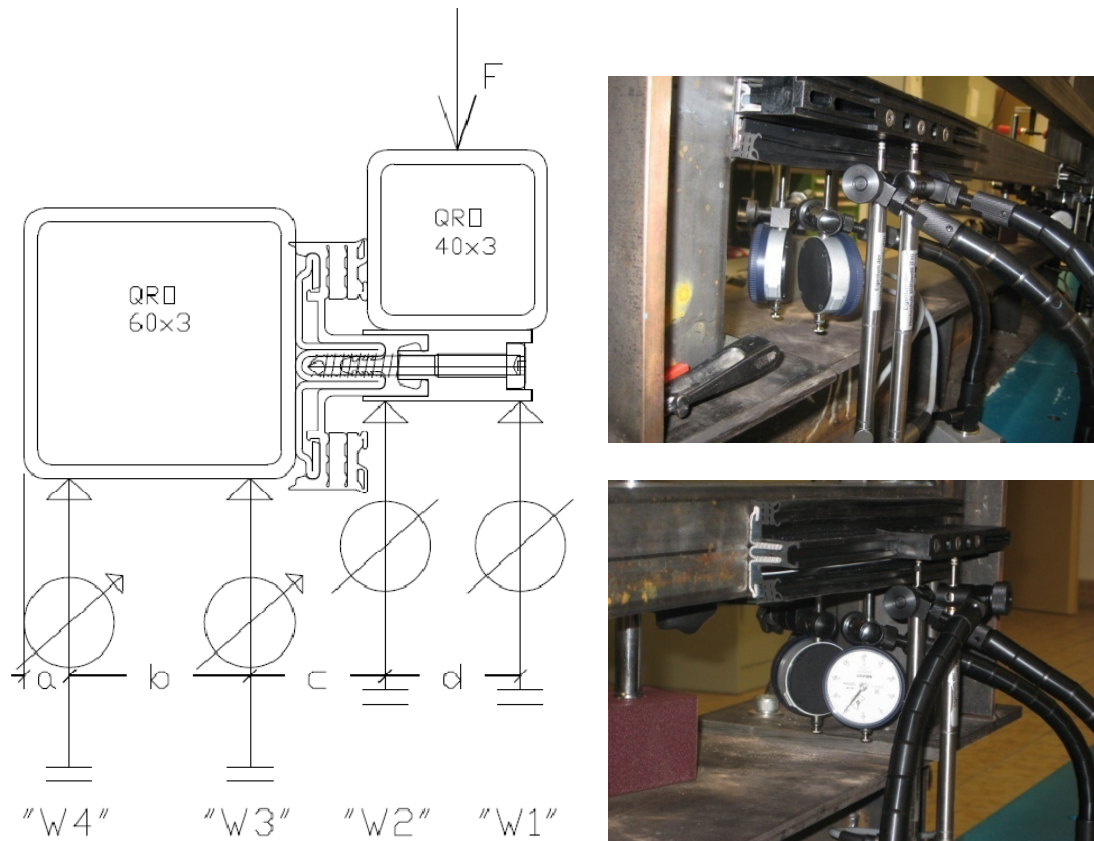


Abbildung 3-10: Großes Bild: Schnitt durch Glasauflager; kleine Bilder: Anordnung der Wegaufnehmer links (oben) und rechts (unten).

Die Abstände a , b , c und d wurden so gewählt, dass zum einen die Messuhren „W3“ und „W4“ außerhalb der Profilrunden angeordnet werden konnten, und zum anderen so genau wie möglich der Übergang zwischen Grundprofil und Glasaufлагerschraube, sowie das freie Ende der Glasaufлагerschraube erfasst wurde. Für die Idealsituation würde dies bedeuten, dass $a_{\text{soll}} = 10\text{mm}$, $b_{\text{soll}} = 40\text{mm}$, $c_{\text{soll}} = 30\text{mm}$ und $d_{\text{soll}} = 30\text{mm}$ für eine Füllungsdicke von 40mm sowie $d_{\text{soll}} = 40\text{mm}$ bei einer Füllungsdicke von 50mm betragen. Da diese Abstände bedingt durch die Versuchsanordnung leicht variieren, wurde die jeweilige Situation für jeden Versuch aufgenommen.

Weiterhin wurde auch der Schraubkanal des Grundprofils mit einer Schiebelehre (Genauigkeit 0,1mm) vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende vermessen. Dies sollte dazu dienen den Anteil, den das Aufbiegen des Schraubkanals an der plastischen Verformung hat, genauer zu erfassen.



Abbildung 3-11: Vermessung des Schraubkanals.

Gefahren wurden die Versuche immer bis zu einer Belastung von 5kN. Der Grund für diese Begrenzung ist zum einen die Überlegung, dass die vom Systemhersteller maximal zugelassene Kraft für die geschraubten Varianten bei 3,5kN liegt. Ab dann ist laut Herstellerinformationen, wie z.B. in [17], eine Lastverteilungsplatte in den Schraubkanal einzuschweißen. Es ist also anzunehmen, dass bei den Varianten, für die diese Begrenzung in den Versuchen maßgebend wird, bei Erreichen einer Last von 5kN schon für die praktische Anwendung nicht mehr hinnehmbare Verformungen auftreten.

Um eine ausreichend feine Abstufung der Messergebnisse zu erreichen, wurde die Last in Inkrementen von 100N bis zur Maximallast gesteigert. Um die zurückbleibenden Verformungen zu erfassen, wurden in Schritten von 500N Zwischenentlastungen durchgeführt.

Mit dieser Versuchsanordnung ist es möglich, jede an der Verformung beteiligte Komponente zu erfassen. Durch die Zwischenentlastungen kann die zurückbleibende plastische Verformung sowohl der Glasauflagerschraube als auch des Grundprofils bestimmt werden. Durch die Vermessung des Schraubkanals kann festgestellt werden, welchen Anteil das Verdrillen des Grundprofils und welchen Anteil das Aufbiegen des Schraubkanals hat.

3.4.2 Kalibriermessungen (Serie A)

Für die Versuche A1 bis A6 war der Versuchsaufbau weitgehend identisch zu dem der Serien B und C. Der hauptsächliche Unterschied bestand in dem bei den Versuchen A4 bis A6 auf die Glasauflager aufgelegten Glasklotz (Universalklotz Fa. Gluske BKV, $d = 4\text{mm}$). So konnte im Vorfeld geklärt werden, ob und inwiefern ein untergelegter Glasklotz Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse hat.



Abbildung 3-12: Glasauflager mit Glasklotz.

Weiterhin wurde bei den Versuchen A1 bis A3 die Vorlast variiert, um herauszufinden, ab wann die Messergebnisse nicht mehr durch den vorhandenen Schlupf beeinflusst werden.

Die Versuche A7 und A8 dienen dazu herauszufinden, inwiefern die Einspannung der Kraftmessdose die Messergebnisse beeinflusst. Trotz des gleichmäßigen und kreuzweisen Anziehens der Schrauben konnte dies nicht ausgeschlossen werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Referenzkraftmessdose (Typ *HBM U93/20kN*) anhand eines geeichten 2kg Gewichts kalibriert. Diese Referenzdose wurde dann über das Stahlschwert

belastet und die Messwerte mit denen des eingespannten Kraftaufnehmers verglichen. Auf der rechten und linken Seite des Stahlschwertes wurden je 10mm von der Kante entfernt induktive Wegaufnehmer angeordnet, um sicherzustellen, dass keine ungewollte Außermitte vorliegt.

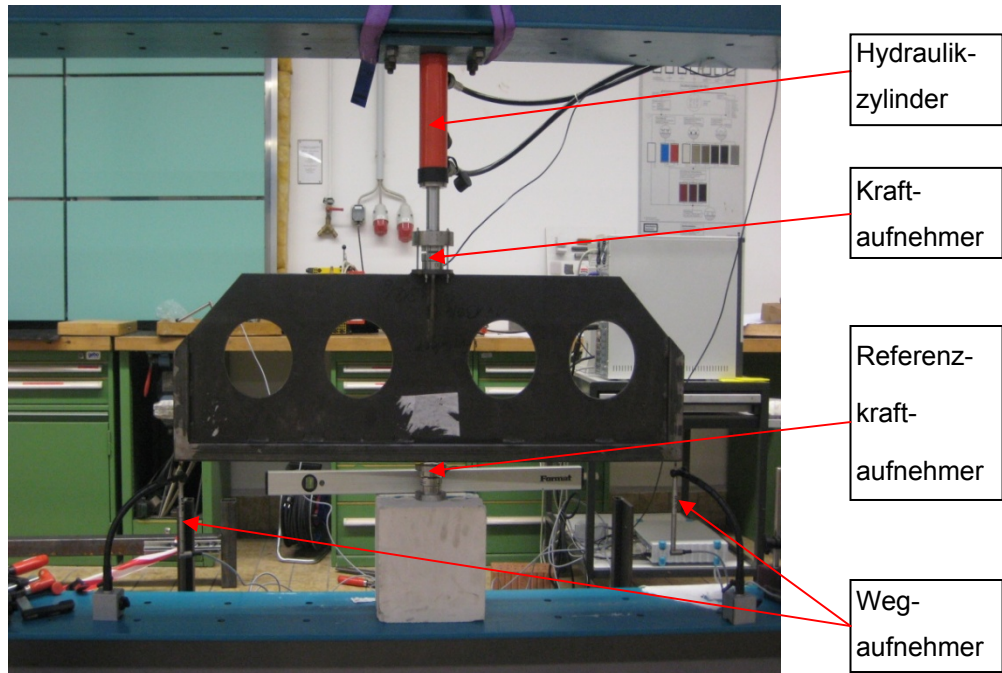


Abbildung 3-13: Versuchsaufbau Versuche A7 und A8.

3.4.3 Zur Wahl des Versuchsaufbaus

Wie schon bemerkt, existieren keine Normen oder anderweitige Standards für die Ermittlung von Kennwerten an Glasauflagern. Deshalb wurde der Versuchsaufbau gemäß den internen Versuchen der Firma esco übernommen und insofern erweitert, dass die Riegelverformung am Glasaufleger mit je zwei Messuhren aufgenommen wird. Die Wahl dieses Versuchsaufbaus hat folgende Vorteile:

- Versuchseinrichtung konnte von der Firma esco übernommen werden
- Einfache Handhabung der Probekörper
- Einfache Versuchsdurchführung
- Es können schnell viele Versuchsreihen ohne große Umbauten durchgeführt werden. Dadurch, dass immer an zwei Punkten gemessen wurde, liegt schnell eine breite Datenbasis für die Auswertung vor.
- Die Versuchsergebnisse können mit schon durchgeführten Versuchen der Firma esco verglichen werden.

Nachteile waren, dass das Einrichten der Messmittel wegen des beengten Platzes unter den Versuchskörpern einer Gedulds- und Geschicklichkeitsprobe gleichkam, sowie dass der Einfluss des Riegels auf die Messergebnisse im Nachhinein „heraus gerechnet“ werden musste. Alles in allem kann der gewählte Versuchsaufbau aber als für diesen Zweck tauglich eingestuft werden.

4 Darstellung der Versuchsergebnisse und Auswertung

4.1 Allgemeines zur Auswertung

Ein Ziel dieser Arbeit ist, den jeweiligen Einfluss der in Kapitel 2 charakterisierten, von der Unterkonstruktion unabhängigen Komponenten qualitativ und quantitativ zu erfassen. Des Weiteren soll das Last-Verformungsverhalten des Bauteiles Glasaufleger soweit untersucht werden, dass eine Berechnung der Gesamtdurchbiegung nach den im Abschnitt 2.2.1 angegebenen Verfahren möglich ist. Die Last, welche nötig ist, um eine Glasauflegerverformung von 1mm zu erzeugen, soll mit den vom Systemhersteller angegebenen zulässigen Lasten verglichen werden.

Dazu ist es nötig, die Versuchsergebnisse vom Einfluss der Unterkonstruktion zu „bereinigen“. Aufgrund der messtechnisch erfassten Verformungen kann man die Vertikalverformung und die Verdrehung des Riegelprofils an der Stelle des Glasauflegers rechnerisch erfassen.

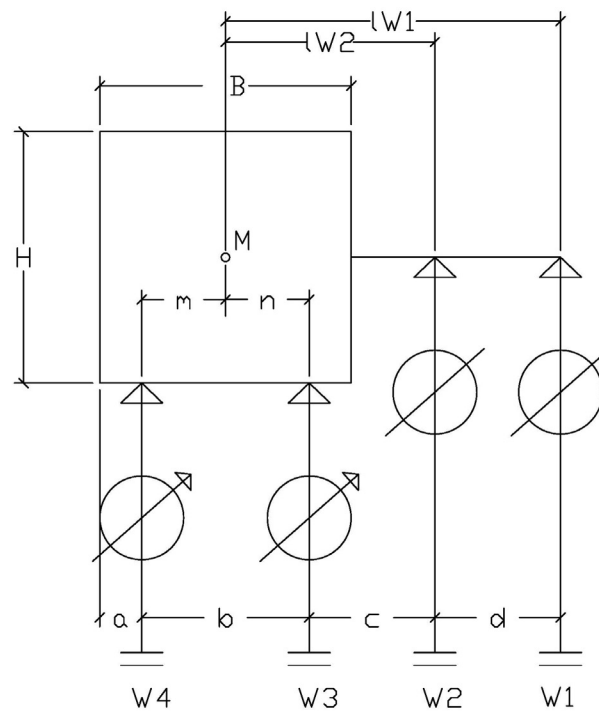


Abbildung 4-1: Versuchsaufbau schematisch.

Das Riegelprofil sei ein doppelsymmetrischer Querschnitt mit $M=S$. H sei die Profilhöhe des Riegelprofils, B die Profilbreite. $W1$ bis $W4$ seien die Messwerte der Messstellen gemäß Abschnitt 3.4.1.

Dann ergibt sich:

$$m = \frac{b_{ist}}{2} - a_{ist} + a_{soll} \quad (4-1)$$

$$n = b_{\text{ist}} - m = \frac{b_{\text{ist}}}{2} + a_{\text{ist}} - a_{\text{soll}} \quad (4-2)$$

$$l_{W2} = n + c_{\text{ist}} \quad (4-3)$$

$$l_{W1} = n + c_{\text{ist}} + d_{\text{ist}}. \quad (4-4)$$

Die Riegelverdrehung an der Messstelle ergibt sich zu

$$\varphi_{x,\text{Riegel}} = \tan^{-1} \left(\frac{W3-W4}{b_{\text{ist}}} \right). \quad (4-5)$$

Die Vertikalverformung des Riegels an der Messstelle berechnet sich aus den Messwerten unter Anwendung der Strahlensätze:

$$\begin{aligned} f_{z,\text{Riegel}} &= \frac{W3 - n \cdot \tan(\varphi) + W3 - \left(\frac{H}{2} \cdot \tan(\varphi) + n \right) \cdot \tan(\varphi)}{2} \\ &= \frac{2 \cdot W3 - n \cdot \tan(\varphi) - \left(\frac{H}{2} \cdot \tan(\varphi) + n \right) \cdot \tan(\varphi)}{2} \\ &= \frac{2 \cdot W3 - 2 \cdot n \cdot \tan(\varphi) - \frac{H}{2} \tan^2(\varphi)}{2} \end{aligned}$$

$$f_{z,\text{Riegel}} = W3 - n \cdot \tan(\varphi) - \frac{H}{4} \cdot \tan^2(\varphi). \quad (4-6)$$

Zieht man jetzt die aus Riegelverdrehung und –durchbiegung resultierenden Vertikalverformungen von den Messwerten W1 und W2 ab, erhält man die vom Einfluss der Unterkonstruktion bereinigten Messergebnisse.

$$f_{z,1} = f_{z,\text{Riegel}} + l_{W1} \cdot \tan(\varphi_{x,\text{Riegel}}) \quad (4-7)$$

$$f_{z,2} = f_{z,\text{Riegel}} + l_{W2} \cdot \tan(\varphi_{x,\text{Riegel}}) \quad (4-8)$$

$$\boxed{W1_{\text{ber}} = W1 - f_{z,1}} \quad (4-9)$$

$$\boxed{W2_{\text{ber}} = W2 - f_{z,2}} \quad (4-10)$$

Im Folgenden wird sich in der Auswertung nur noch auf die bereinigten Werte bezogen. Die tatsächlichen Messwerte für alle Messstellen können dem Anhang 01 entnommen werden.

Bemerkung zur Statistik

Aus den Messwerten am rechten und linken Glasaufleger wurden für jeden Versuch die Mittelwerte gebildet. Diese bilden die Grundlage der Versuchsauswertung. Die Last-Verformungskurven der Glasaufleger innerhalb eines Versuches verlaufen mit geringem Abstand kongruent zueinander. Es ist daher anzunehmen, dass der Mittelwert die tatsächlichen Kurvenverläufe ausreichend genau wiedergibt. Weitergehende statistische Auswertung, wie die Bildung von Fraktilen, war aufgrund zu kleiner Probenumfänge nicht möglich (siehe dazu auch [30]).

4.2 Auswertung der Kalibriermessungen (Serie A)

4.2.1 Ziel der Versuche

Ziel der Kalibrierversuche in der Serie A war, den Einfluss des Glasklotzes auf die Versuchsergebnisse zu bestimmen. Kunststoffklötze weisen auf ihrer Unterseite verschiedene Profilierungen auf. Die Art und Lage dieser Profilierung bestimmt die lastabtragende Fläche, d.h. die Kontaktfläche zwischen Glasklotz und dem Stahlschwert und damit auch die Stelle, an welcher der Kraftübergang stattfindet.

4.2.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Zur Verfügung standen Glasklötze des Fabrikates *Gluske GL-B* mit einer Dicke von 4mm und Breiten von 40mm und 50mm. Um unterschiedlich große Kontaktflächen sowie eine asymmetrische Verteilung der Kontaktflächen zu simulieren, wurden Versuche ohne Glasklotz, einem Glasklotz von 40mm Breite und einem Glasklotz von 50mm Breite bei einer Füllungsdicke von 40mm untersucht. Abbildung 4-2 zeigt die Ergebnisse der Versuche A2 bis A6, der Versuch A1 wird aufgrund messtechnischer Probleme nicht gewertet.

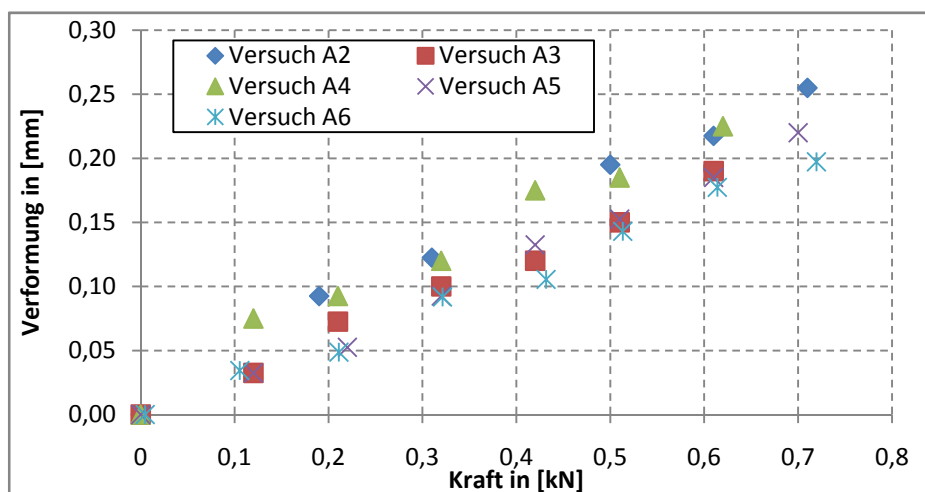


Abbildung 4-2: Last-Verformungserhalten Versuche A2 bis A6.

Wie zu erwarten war, ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchen ohne Klotz (A2) und mit Klotz (A3-A6) ersichtlich.

Eine andere Schlussfolgerung aus diesen Versuchen ist, dass die Ergebnisse bei relativ geringen Belastungen durch Schlupf verfälscht werden. Der Schlupf kommt in diesem Fall durch einen Reibverbund zwischen Glasaufleger und Riegeldichtung, welcher sich bei größer werdender Belastung löst, zustande.

Da keine plastischen Verformungen festgestellt werden konnten, wurden die Versuche A3 bis A6 am selben Probekörper *ohne* Auswechseln des Glasauflegers durchgeführt. Die Versuche A3 und A4 zeigen relativ große Unterschiede im Kurvenverlauf. Nach dieser zweimaligen Vorbelastung zeigen die Versuche A5 und A6 kaum Unterschiede im

Kurvenverlauf. Daraus ist zu schlussfolgern, dass nach der zweimaligen Vorbelastung der Reibverbund gelöst ist und die Ergebnisse nicht mehr verfälscht werden.

Bei allen weiteren Versuchen wurde deshalb eine Vorbelastung der Probekörper mit 2x 500N durchgeführt, um den Einfluss des Schlupfes zu begrenzen.

Ein weiteres Ziel der Versuche in der Serie A war die Kalibrierung der Kraftmessdose. Aufgrund der Einspannung in die Aufnahme konnten trotz sorgfältigem und gleichmäßigem Anziehen der Gewindestangen Abweichungen bei den Messergebnissen nicht ausgeschlossen werden.

Die Kraftmessdosen des verwendeten Typs messen die aufgebrachten Kräfte induktiv. Im Inneren befindet sich eine DMS-Vollbrücke. Durch eine äußere Kraft und der damit einhergehenden Längenänderung der DMS (=Dehnmessstreifen) ändert sich auch der Widerstand der Dehnmessstreifen. Für jede Kraftmessdose existiert ein Prüfwert, welcher einer relativen Widerstandsänderung eine Kraftänderung zuweist. Der Zusammenhang zwischen der Widerstandsänderung in den Dehnmessstreifen und der aufgebrachten Kraft ist nahezu linear. Die verwendete Messsoftware *BEAM* [14] interpoliert deshalb linear zwischen dem auftretenden Widerstand und dem Prüfwert zur Ermittlung der aufgebrachten Kraft. Zur Kalibrierung ist es nur erforderlich, den Prüfwert zu verschieben und damit den Anstieg der Kennlinie des Kraftaufnehmers zu ändern.

Wie Abbildung 4-3 zeigt, weichen die Messwerte vor der Kalibrierung voneinander ab, wie zu erwarten, verlaufen aber beide Graphen linear. Nach Anpassung des Prüfwertes für den eingespannten Kraftaufnehmer messen beide Kraftaufnehmer nahezu identisch. Die noch verbliebene Abweichung liegt bei $\pm 0,0048\text{kN}$ und ist damit vernachlässigbar gering.

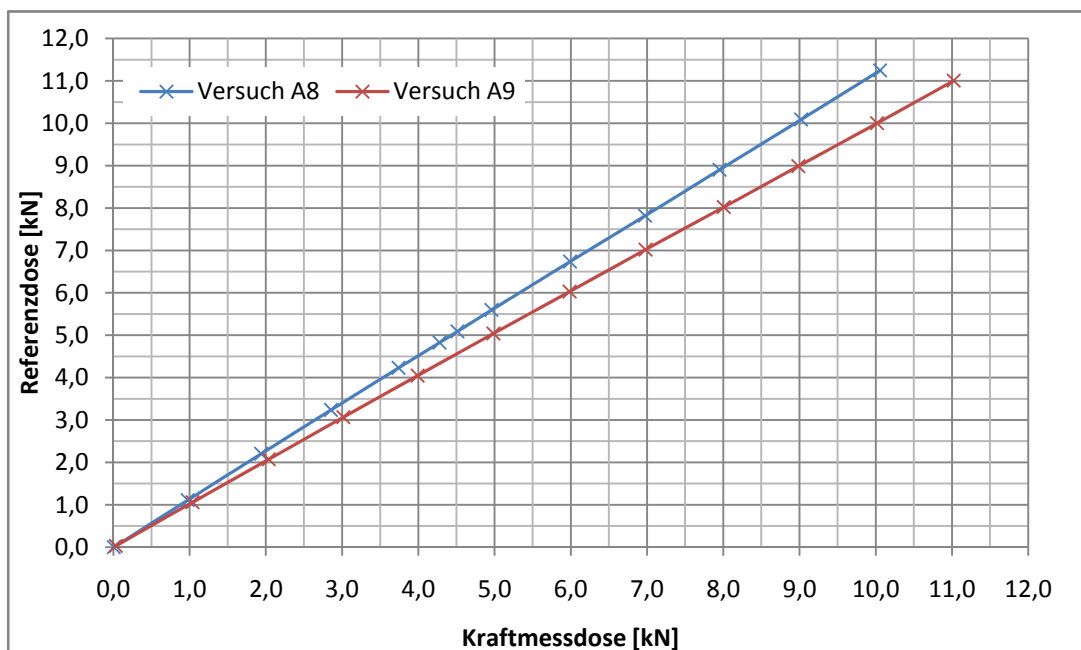


Abbildung 4-3: Kalibrierung der Kraftaufnehmer.

4.3 Auswertung der Serien B und C

4.3.1 Ziel der Versuche und Übersicht über die Ergebnisse

Ziel der Variantenuntersuchungen war, durch einen Vergleich der Versuchsergebnisse Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener, vom betrachteten Fassadensystem abhängiger Faktoren auf das Tragverhalten zu ziehen. Mögliche Einflussfaktoren wurden in Kapitel 2 zusammengestellt. Das Versuchsprogramm in Kapitel 3 zeigt, mit welchem Versuch welcher Einfluss erfasst werden soll. Weiterhin sollten die Ergebnisse zum kalibrieren einer Finite-Elemente-Simulation herangezogen werden. Auf der Grundlage der Simulationsergebnisse kann eine Vorooptimierung von neuen Glasauflegerkonstruktionen stattfinden.

Die Kraft wurde, wie in Kapitel 3 ausgeführt, über ein Stahlschwert auf den Probekörper aufgebracht. Um die Versuchsergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, wurde bei der Auswertung die gemessene Gesamtkraft durch die Anzahl der verwendeten Schrauben geteilt. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die gemessenen Verformungen an der Glasauflegerspitze (Messpunkt W1).

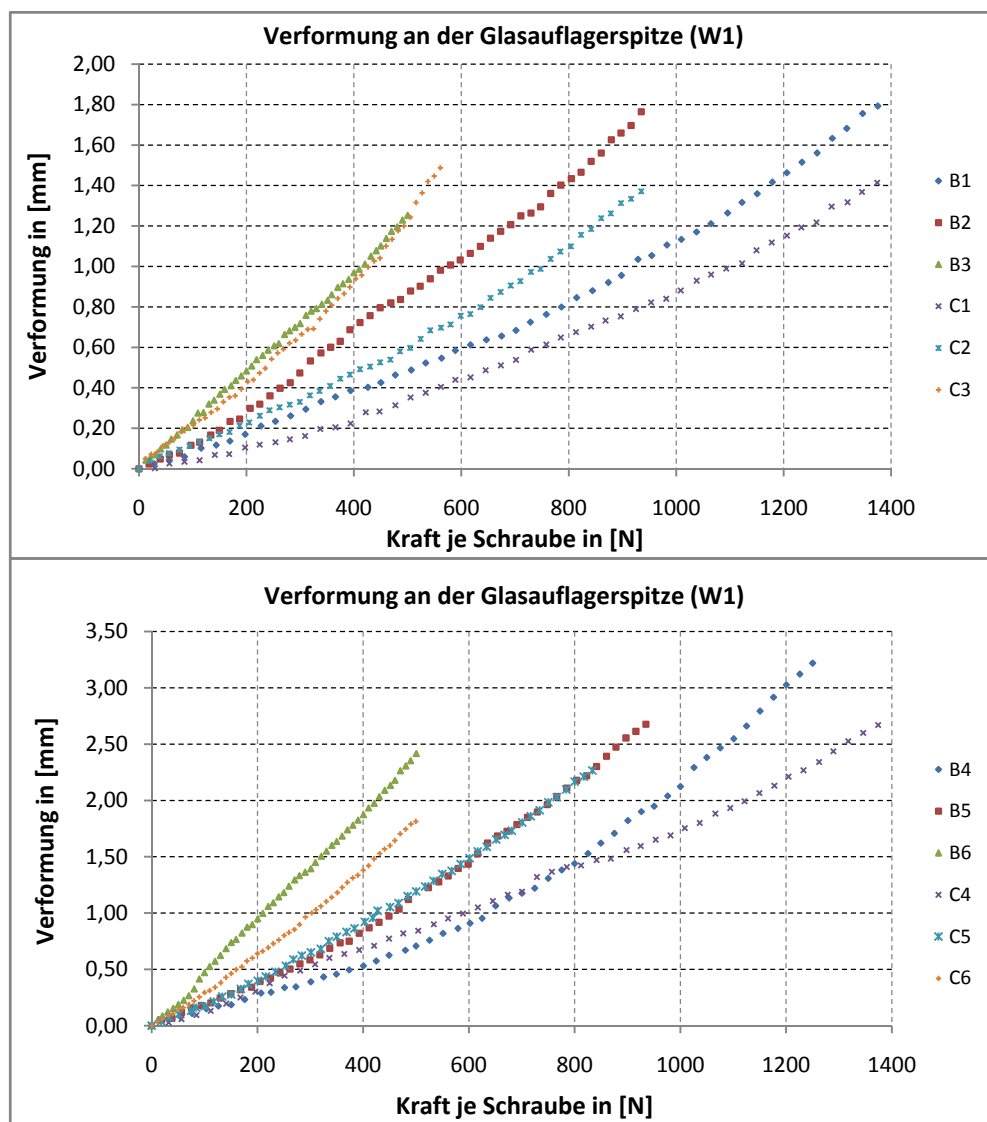


Abbildung 4-4: Verformungen am Punkt W1 für die Versuche B1 bis B6 und C1 bis C6.

In Tabelle 4-1 werden die Versuchsergebnisse hinsichtlich eines Gebrauchstauglichkeitskriteriums von $f_{\max} = 1\text{ mm}$ miteinander verglichen. Die Gründe für die Wahl dieser Begrenzung sind im Abschnitt 2.3 dargelegt worden. Dargestellt wird die Gesamtkraft, welche bis zum Erreichen des Gebrauchstauglichkeitskriteriums auf beide Glasaufleger aufgebracht wurde, die daraus resultierende Kraft je Schraube sowie die entsprechenden Federkonstanten als Maß für die Steifigkeit der Glasaufleger.

Tabelle 4-1: Übersicht über die Versuchsergebnisse.

Versuchsbezeichnung	$F_{1\text{mm}} \text{ gesamt}$ [N]	$F_{1\text{mm}} \text{ je}$ Schraube [N]	$c_{1\text{mm}}$ [mm/kN]	$c_{5\text{kN}}$ [mm/kN]
B1	3700	925	0,27	0,31
B2	3500	580	0,29	0,30
B3	4100	410	0,24	0,25
B4	2550	640	0,39	0,64
B5	2750	450	0,36	0,46
B6	2100	210	0,48	0,48
C1	4500	1125	0,22	0,24
C2	4500	750	0,22	0,24
C3	4300	430	0,23	0,25
C4	2400	600	0,42	0,47
C5	2500	420	0,40	0,45
C6	3000	300	0,33	0,36

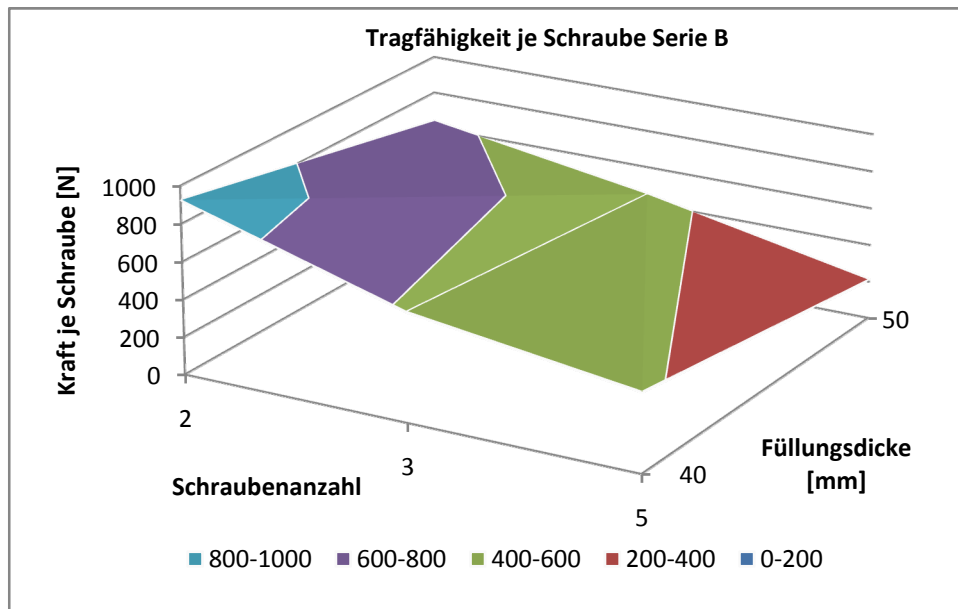


Abbildung 4-5: Übersicht über die Versuchsergebnisse Serie B.

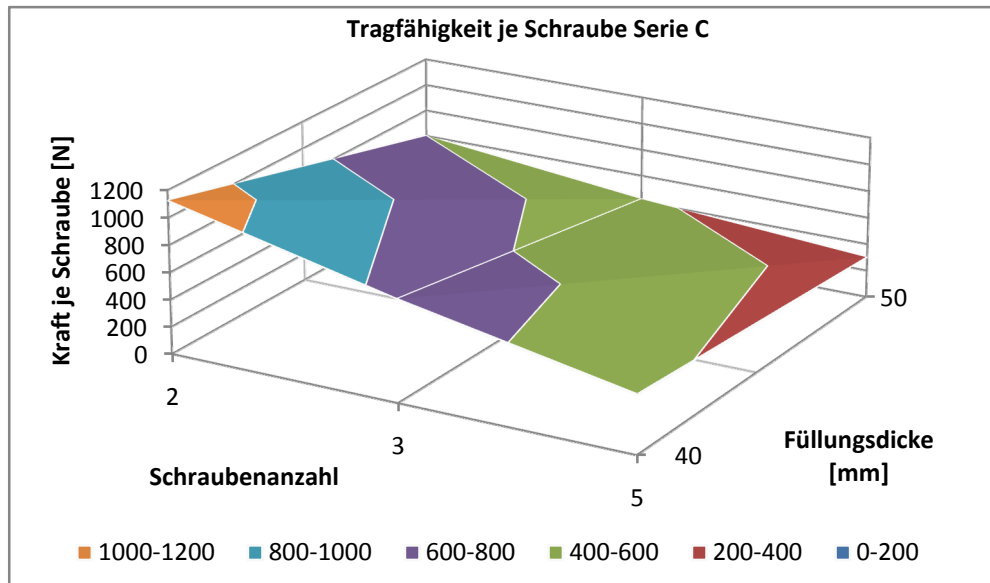


Abbildung 4-6: Übersicht über die Versuchsergebnisse Serie C.

Aus diesen Darstellungen werden folgende Tendenzen deutlich: Negativ auf die Tragfähigkeit je Schraube wirken sich erwartungsgemäß geringere Schraubenabstände und eine größere Füllungsdicke aus. Die Verbindungen mit einem zusätzlichen Schweißpunkt über dem Glasaufleger reagieren deutlich steifer, was darauf schließen lässt, dass die Grundprofilverdrehung die Tragwirkung maßgeblich beeinflusst. Weiterhin wird von den Versuchsergebnissen nahezu ideal eine Ebene aufgespannt (Abb. 4-5 und 4-6). Es ist daher durchaus möglich, dass zwischen den variierten Einflussgrößen eine lineare Abhängigkeit besteht.

Offensichtlich aus Abbildung 4-4 zu erkennen ist, dass die Versuche B4 und B5 Ausreißer sind und nicht in die Systematik der Ergebnisse passen. Sie reagieren ähnlich steif wie die Versuche C4 und C5. Gründe dafür können Streuungen der Materialeigenschaften oder ein größerer Wärmeeintrag beim Aufschweißen der Grundprofile sein. Möglich ist auch eine schwankende Vorspannkraft der Glasauflasserschrauben. Die genaue Ursache für die Abweichungen konnte nicht abschließend geklärt werden.

Weiterhin werden folgende Faktoren untersucht (vgl. Abschnitt 2.4):

- Einfluss der Füllungsdicke und damit der Schraubenlänge auf die Tragfähigkeit
- Einfluss der Schraubenanzahl und damit der Schraubenabstände auf die Tragfähigkeit
- Einfluss der Grundprofilverdrehung

4.3.2 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Füllungsdicke

Erwartungsgemäß treten bei den Varianten mit 50mm simulierter Füllungsdicke größere Gesamtverformungen auf als bei den Varianten mit 40mm Füllungsdicke (vgl. Abbildung 4-4). Auch die aufgebrachte Kraft bis zum Erreichen der Verformungsgrenze ist geringer.

Vergleicht man die Versuche, welche sich nur im Parameter Füllungsdicke unterscheiden, miteinander, ist es möglich, quantitative Rückschlüsse auf den Einfluss der Füllungsdicke auf das Tragverhalten zu ziehen. Zum Vergleich wurden die Werte aus Tabelle 4-1 herangezogen.

Tabelle 4-2: Aufgenommene Kräfte im Verhältnis der Füllungsdicken.

B4/B1	B5/B2	B6/B3	C4/C1	C5/C2	C6/C3
0,69	0,79	0,51	0,53	0,56	0,70

Mittelwert: 0,63

Zum Vergleich:

Verhältnis der Füllungsdicken: $40\text{mm}/50\text{mm} = 0,8$

Quadratisches Verhältnis der Füllungsdicken: $40^2/50^2 = 0,64$

Verhältnis der Schraubenlängen: $28\text{mm}/40\text{mm} = 0,70$

Quadratisches Verhältnis der Schraubenlängen: $28^2/40^2 = 0,49$

Die aufgenommene Kraft bis zum Erreichen der Verformungsgrenze der Varianten mit 50mm Füllungsdicke sinkt auf ca. 63% der Varianten mit 40mm simulierter Füllungsdicke. Man könnte eine Abhängigkeit vom quadratischen Verhältnis der Füllungsdicken vermuten. Dies würde auch die Annahme bestätigen, dass das Glasauflager wie ein Kragbalken wirkt, welcher durch das Stahlschwert mit einer Gleichstreckenlast belastet wird.

Die Ergebnisse streuen aber sehr stark um den Mittelwert, sodass sich eine eindeutige Abhängigkeit nicht bestätigen lässt. Um mehr Informationen darüber zu erhalten, wie sich die Füllungsdicke auf das Tragverhalten auswirkt, sind weitere Variantenuntersuchungen nötig.

4.3.3 Abhängigkeit der Tragfähigkeit vom Schraubenabstand

Um Aufschluss über den Einfluss des Schraubenabstands und damit indirekt auch den Einfluss der Schraubkanalbiegung auf das Tragverhalten zu erhalten, wurden die Schraubabstände variiert.

Dies geschah über die Anzahl der Glasaufegerschrauben. Da der Abstand der Glasaufegerschrauben untereinander durch die Geometrie des Glasaufegers bestimmt ist, wird die Schraubenanzahl je Glasaufleger als Vergleichskriterium gewählt. Je höher die Anzahl der Glasaufegerschrauben je Glasaufleger, desto geringer der Abstand der Glasaufegerschrauben untereinander.

Die gemessenen Verformungen am Messpunkt W2 zeigen für große Schraubenabstände (Versuche B1, C1 sowie B4 und C4, zwei Schrauben je Glasaufleger) einen nahezu linearen Verlauf, wie in den Abbildungen 4-7 und 4-8 zu erkennen ist. Dies lässt darauf schließen, dass der Schraubkanal bei dieser Konfiguration sich nahezu linear-elastisch verhält. Große plastische Verformungen sind nicht zu erwarten.

Mit zunehmender Schraubenanzahl und damit kleiner werdenden Schraubenabständen wird der Anstieg der Verformungskurven immer steiler, es stellen sich große Verformungen bei einem geringeren Kraftniveau ein.

Hinzu kommt, dass der Kurvenverlauf mit kleiner werdenden Schraubenabständen zunehmend von einem linearen Verlauf abweicht, was auf einen größer werdenden Anteil plastischer Verformungen schließen lässt. Die Abbildungen 4-9 und 4-10 bestätigen diese Annahme.

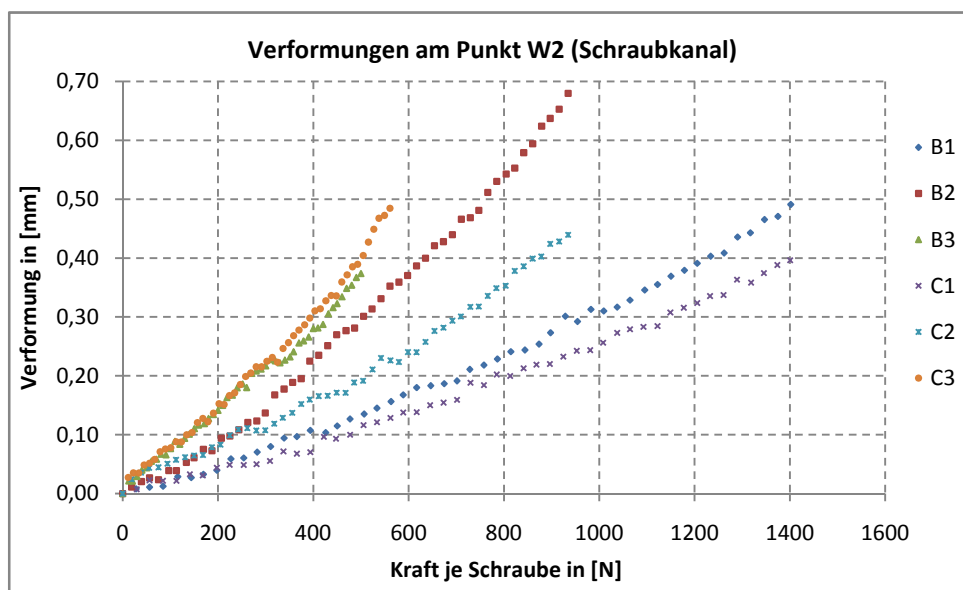


Abbildung 4-7: Verformungen am Punkt W2 für die Versuche B1 bis B3 und C1 bis C3.

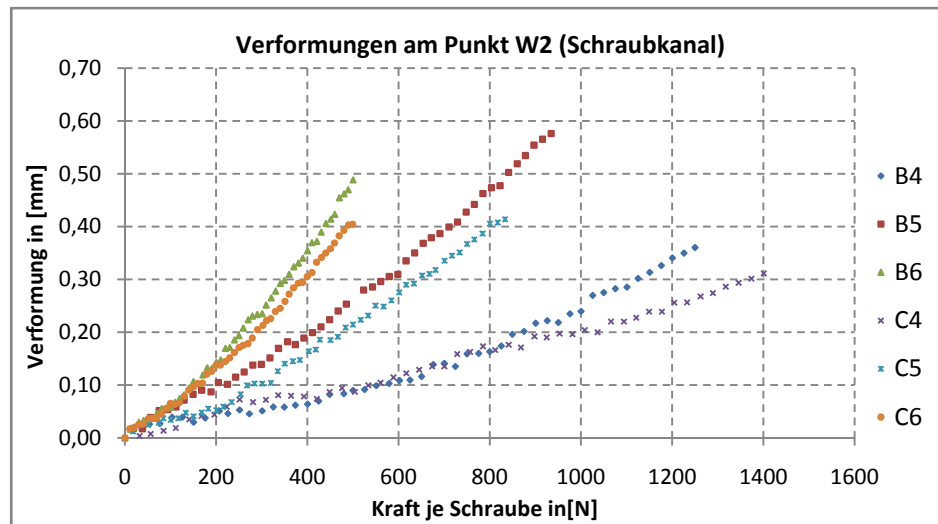


Abbildung 4-8: Verformungen am Punkt W2 für die Versuche B4 bis B6 und C4 bis C6.

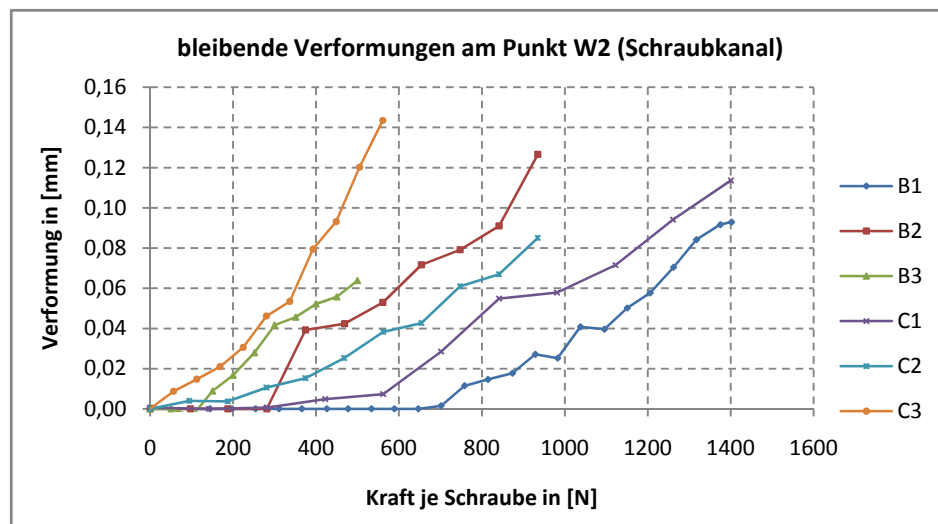


Abbildung 4-9: Bleibende Verformungen am Schraubkanal bei den Versuchen B1 bis B3 und C1 bis C3.

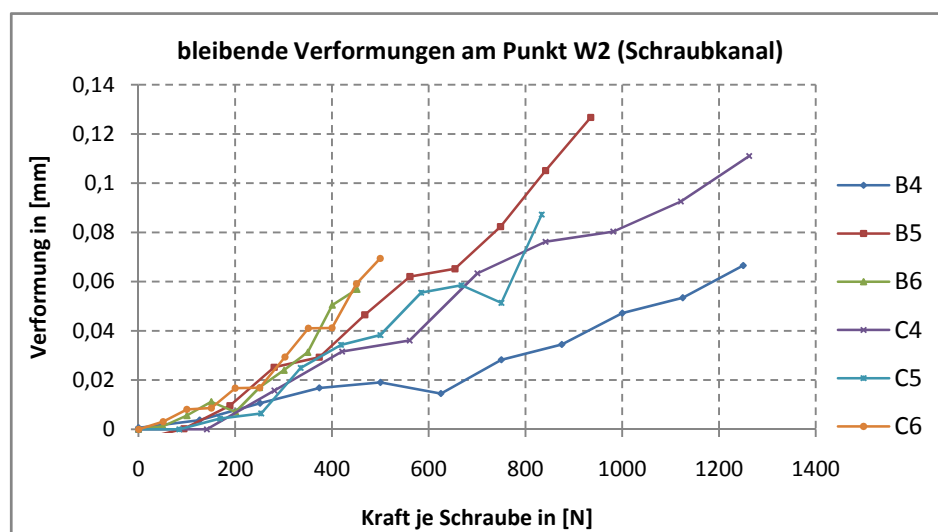


Abbildung 4-10: Bleibende Verformungen am Schraubkanal bei den Versuchen B4 bis B6 und C4 bis C6.

Wie man weiterhin aus den Abbildungen erkennen kann, bleibt sowohl die Größenordnung der Gesamtverformung als auch die Größenordnung der bleibenden (plastischen) Verformung am Schraubkanal bis zum Erreichen der jeweiligen Maximallast, unabhängig von der simulierten Füllungsdicke, in etwa gleich. Tendenziell ist sogar zu beobachten, dass Gesamtverformung und bleibende Verformung des Schraubkanals bei 50mm Füllungsdicke geringer ausfällt als bei 40mm Füllungsdicke. Ein Grund für diesen ungewöhnlichen Effekt konnte nicht gefunden werden.

Durch den Schweißpunkt (Serie C) über dem Glasaufleger wird die Gesamtverformung am Schraubkanal verringert. Die plastische Verformung setzt bei den Versuchen der Serie C erst wesentlich später ein als bei den entsprechenden Versuchen aus Serie B. Mit größer werdender Füllungsdicke als auch mit sinkenden Schraubenabständen treten plastische Verformungen bei immer geringeren Kräften auf.

Betrachtet man die bleibenden Verformungen am Punkt W1 in den folgenden Abbildungen, kann man erkennen, dass bei einer Füllungsdicke von 40mm und großen Schraubenabständen der Kurvenverlauf nahezu ausschließlich durch die Materialeigenschaften der Schraube bestimmt wird. Deutlich ist dies an den Kurven für die gemessene bleibende Verformung der Versuche B1 und C1 zu sehen, welche qualitativ nahezu exakt dem in Abschnitt 2.2.2 gezeigten Materialmodell für Edelstahl entsprechen. Man kann also für diesen Fall davon ausgehen, dass die Schrauben starr im Schraubkanal eingespannt sind.

Mit zunehmender Füllungsdicke und kleiner werdenden Schraubenabständen und damit einer größer werdenden zweiachsigen Biegebeanspruchung des Schraubkanals macht sich der Einfluss der Nachgiebigkeit auf die Gesamtverformung zunehmend bemerkbar. Die Kurvenverläufe werden flacher, die Steifigkeit nimmt also ab.

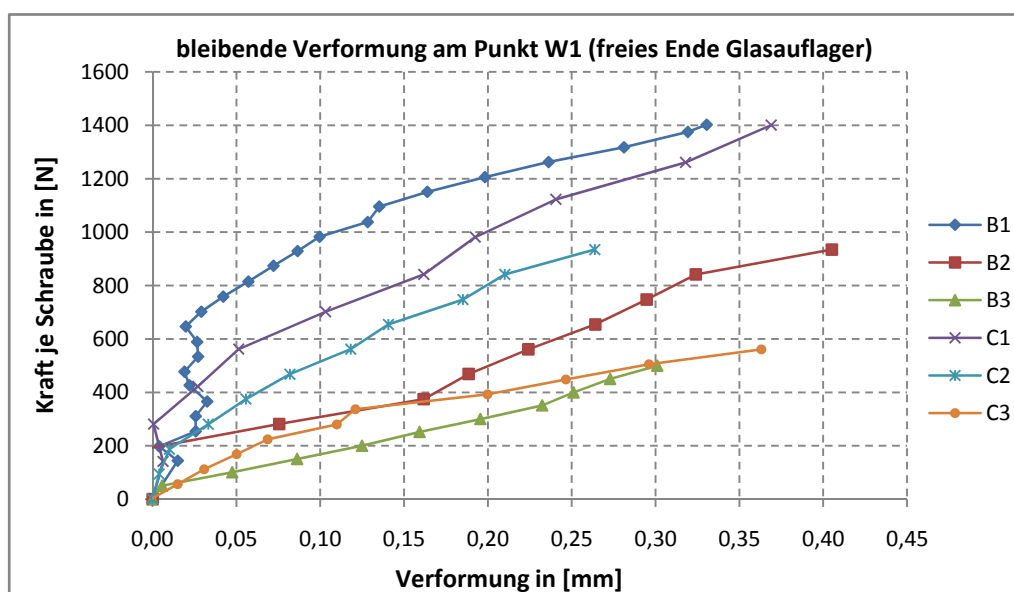


Abbildung 4-11: Bleibende Verformung am Messpunkt W1 für die Versuche B1 bis B3 und C1 bis C3.

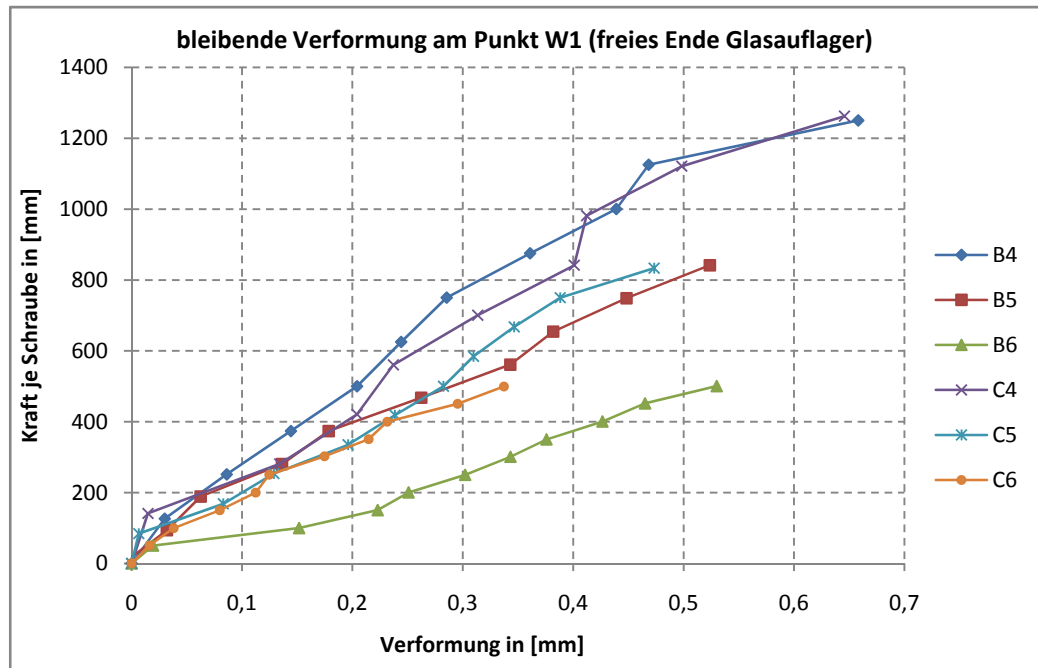


Abbildung 4-12: Bleibende Verformung am Messpunkt W1 für die Versuche B4 bis B6 und C4 bis C6.

Um den Einfluss der Schraubenabstände auf das Verformungsverhalten auch quantitativ zu erfassen, werden die erreichten Lasten aus den Versuchen mit unterschiedlicher Schraubenanzahl miteinander ins Verhältnis gesetzt. Als Grundlage werden wieder die Werte aus Tabelle 4-1 herangezogen. Dabei wird folgende Strategie verfolgt: Aufgrund der vorausgegangenen Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass bei den Varianten mit zwei Schrauben je Glasauflager die Verbindung ihre volle Tragfähigkeit hat. Bei geringer werdenden Schraubenabständen macht sich zunehmend der Einfluss der Schraubkanalbiegung bemerkbar, die aufgenommene Kraft je Schraube wird geringer. Vergleicht man sukzessive die Varianten mit drei bzw. fünf Schrauben mit der Zwei-Schrauben-Variante, kann der Tragfähigkeitsverlust durch die geringeren Schraubenabstände angegeben werden.

Tabelle 4-3: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und drei Schrauben je Glasauflager):

B2/B1	B5/B4	C2/C1	C5/C4
0,63	0,70	0,66	0,70

Mittelwert: 0,67

Tabelle 4-4: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und fünf Schrauben je Glasauflager):

B3/B1	B6/B4	C3/C1	C6/C4
0,44	0,33	0,38	0,50

Mittelwert: 0,41

Die Verschlechterung der Tragfähigkeit durch geringe Schraubenabstände fällt überraschend deutlich aus: Bei 40mm Schraubenabstand (drei Schrauben je Glasaufleger) verringert sich die Tragfähigkeit auf 2/3, bei 20mm Schraubenabstand sogar auf rund 40% der Tragfähigkeit! Dieser Umstand würde bedeuten, dass eine Erhöhung der Schraubenanzahl je Glasaufleger durch die nachteilige gegenseitige Beeinflussung zu nahezu keiner Steigerung der aufnehmbaren Gesamtlast führt.

4.3.4 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Profilverdrehung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten schon mehrfach bemerkt, reagieren die Varianten mit zusätzlichem Schweißpunkt über dem Glasaufleger wesentlich steifer. Da der Schweißpunkt direkt über dem Glasaufleger die Profilverdrehung in diesem Bereich verhindert, lässt dieser Umstand den Schluss zu, dass die Glasauflegerverdrehung einen wesentlichen Anteil an der Gesamtverformung hat.

Durch den zusätzlichen Schweißpunkt über dem Glasaufleger konnte die Tragfähigkeit bis zum Erreichen des 1mm-Kriteriums um durchschnittlich 25% gesteigert werden. Bei der Weiterentwicklung des Glasauflegers sollte also Wert darauf gelegt werden, die Glasauflegerverdrehung zu begrenzen.

Tabelle 4-5: Abhängigkeit von der Profilverdrehung.

C1/B1	C2/B2	C3/B3	C4/B4 ¹⁰	C5/B5 ¹¹	C6/B6
1,22	1,29	1,05	0,94	0,93	1,43

Mittelwert: 1,25

Es ist weiterhin anzunehmen, dass die Verformungen aufgrund der Glasauflegerverdrehungen auch bei hohen Lasten im elastischen Bereich bleiben. Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte bei den gemessenen bleibenden Verformungen kein wesentlicher Unterschied zwischen den Varianten mit freier und behinderter Glasauflegerverdrehung festgestellt werden.

¹⁰ nicht gewertet

¹¹ nicht gewertet

4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Aus den Versuchen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Erwartungsgemäß nehmen Tragfähigkeit und Steifigkeit mit zunehmender Füllungsdicke ab. Es hat dabei den Anschein, dass die Steifigkeit im quadratischen Verhältnis der Füllungsdicken abnimmt. Die Messergebnisse zeigen aber eine hohe Varianz, weitere Versuche zur Validierung dieser Annahme sind nötig.
- Eine Erhöhung der Schraubenanzahl beeinflusst die Steifigkeit des Glasaufagers ungünstig. Grund dafür ist der geringere Schraubenabstand bei höherer Schraubenanzahl, welcher sich negativ auf die Beanspruchung des Schraubkanals auswirkt (zweiachsige Biegung). Überraschenderweise nimmt die aufgenommene Last je Schraube bis zum Erreichen der Verformungsgrenze von 1mm bei vergrößerter Schraubenanzahl so stark ab, dass in Bezug auf die Gesamtlast nahezu keine Laststeigerung erreicht werden konnte.
- Die Verdrehung des Grundprofils aus der Ebene hinaus beeinflusst das Tragverhalten maßgeblich. Durch die Verhinderung dieser Verdrehung mit dem zusätzlichen Schweißpunkt über dem Glasaufleger konnte die aufgenommene Last bis zum Erreichen der 1mm-Grenze um durchschnittlich 25% gesteigert werden.
- Plastische Verformungen treten fast ausschließlich im Bereich des Schraubkanals auf. Die Schrauben bleiben über weite Bereiche hinweg entsprechend dem Materialverhalten von Edelstahl elastisch.

5 Untersuchung der Glasauflager mit der Finite-Elemente-Methode

5.1 Allgemeines

Für die Nachrechnung der Versuche wurde die Finite-Elemente-Software *Straus7* der Firma *G+D Computing Pty Ltd* aus Sydney/NSW/Australien benutzt. Mit dieser Software ist es möglich, sowohl lineare als auch Material- und geometrisch nichtlineare Berechnungen durchzuführen. Die Dokumentation für *Straus7* [19], [20] sowie das Verification Manual [21] kann dem Anhang 04 entnommen werden.

Ziel der Untersuchung war das Aufstellen und Kalibrieren eines Finite-Elemente-Modells. Ist es möglich, Aussagen über das Tragverhalten von Glasauflagern anhand einer Computersimulation zu treffen, kann anhand der gewonnenen Informationen eine Voroptimierung der Prototypen stattfinden und so die Anzahl kosten- und zeitintensiver Bauteilversuche verringert werden.

Des Weiteren wurde an einem Modell gearbeitet, welches in einer vertretbaren Zeit berechnet werden kann. Aus diesem Grund wurde auf die Verwendung von Volumenelementen bei der Modellierung verzichtet. Die benötigte Rechenzeit für das untersuchte Modell lag je Versuch bei etwa 35 bis 45 Minuten.

5.2 Modellbildung

In diesem Abschnitt werden die zur Modellierung benutzten Instanzen näher beschrieben. Es wird besonderes Augenmerk auf die die Rechenergebnisse beeinflussenden Attribute gelegt. Eine genaue Beschreibung der benutzten Instanzen ist [20] zu entnehmen.

5.2.1 Materialmodelle

Zur Diskretisierung des Grundprofilwerkstoffes S280GD wurde ein linearelastisch-idealplastisches Werkstoffverhalten gewählt. Die Streckgrenze wurde zu $f_{y,k} = 280\text{N/mm}^2$ gewählt, obwohl die zur Verfügung gestellten Analysewerte etwas höhere Werte zeigen. Der E-Modul bis zur Streckgrenze wurde mit $E = 210000\text{N/mm}^2$ festgelegt. Programmintern werden die Verformungen über das Tangentenmodul berechnet. Um daher numerische Schwierigkeiten nach Erreichen der Streckgrenze durch die Annahme eines idealplastischen Verhaltens zu vermeiden (Division durch Null), wurde im plastischen Bereich eine geringe Verfestigung mit $E_T = E/1000 = 2100\text{N/mm}^2$ angenommen. Vgl. dazu auch [25]. Die Eingabe in das Programm erfolgt durch das Festlegen von drei Punkten der Spannungs-Dehnungsbeziehung.

Für die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Schraubenwerkstoffs wurde das *RAMBERG-OSGOOD-Gesetz* gewählt. Die Grundlagen dazu sowie die gewählten Materialparameter wurden in Abschnitt 2.2.2 erläutert. Im Programm *Straus7* ist dieses Materialmodell bereits implementiert. Der E-Modul ist dabei aber nicht kontinuierlich veränderlich, sondern wird als Sekantenzug zwischen vom Benutzer definierten Punkten abgebildet.

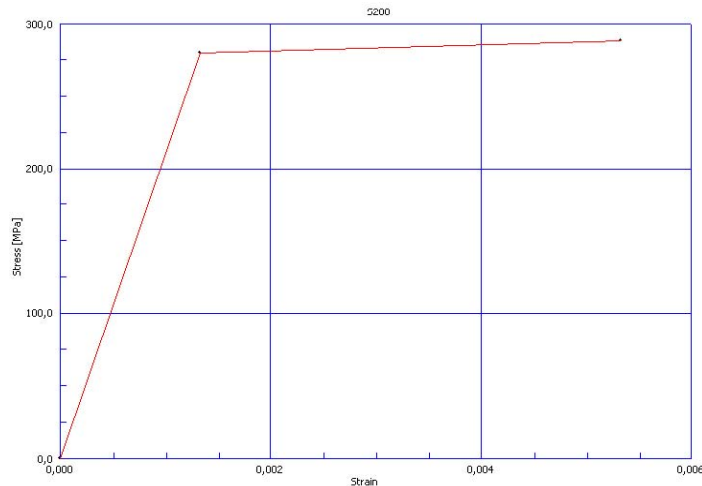


Abbildung 5-1: Spannungs-Dehnungs-Beziehung S280.

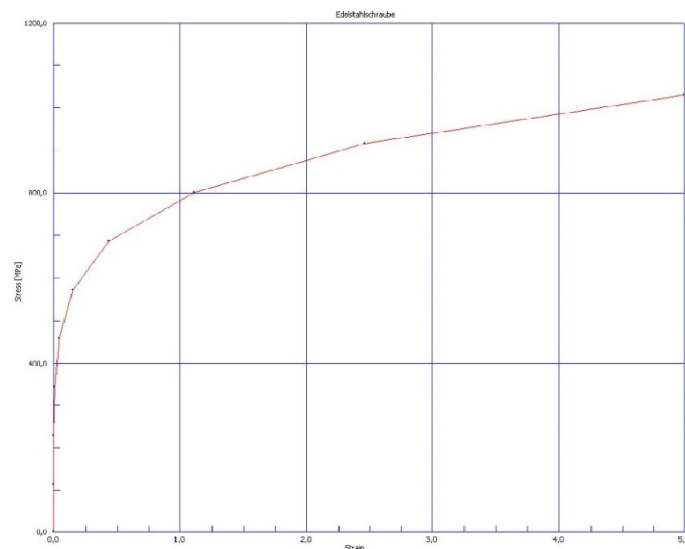


Abbildung 5-2: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Schraubenwerkstoff.

Zur Berücksichtigung aller Spannungskomponenten wurde die Gestaltänderungsarbeitshypothese von *VON MISES* gewählt. Für den allgemeinen Fall, d.h. für den dreiachsigen Spannungszustand, gilt für die Vergleichsspannung:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (5-1)$$

Für duktile Werkstoffe wie Stahl hat sich die Gestaltänderungsarbeitshypothese durchgesetzt.

Die Fließbedingung bzw. das Fließkriterium für beliebige Spannungszustände lautet:

$$\sigma_v \geq f_y. \quad (5-2)$$

Weiterhin werden alle Materialien als isotrop angesehen, es gilt das generalisierte *HOOKE*sche Gesetz.

5.2.2 Modellierung der Schraube

Die Schraube wurde mit Beam2-Elementen modelliert. Beam2-Elemente sind 2-knotige Elemente und besitzen sechs Freiheitsgrade je Knoten, je drei Freiheitsgrade für Translation und Rotation.

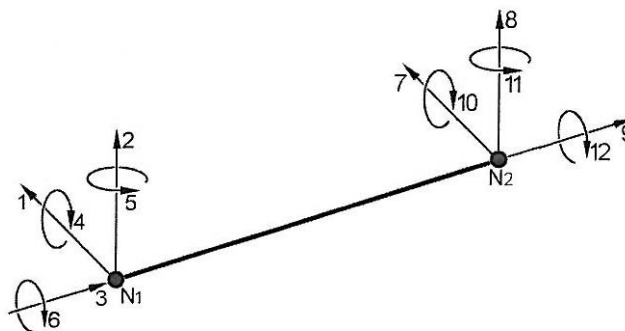


Abbildung 5-3: Freiheitsgrade an einem Beam2-Element.

Nach Herstellerangaben eignet sich das Beam2-Element sehr gut für die Modellierung von schlanken ($l \gg h$) und hauptsächlich auf Biegung beanspruchten Stabelementen. Die Schubverformung wird bei der Verformungsberechnung vernachlässigt.

5.2.3 Modellierung Grundprofil

Für die Modellierung des Grundprofils wurden vierseitige zweidimensionale Schalenelemente von Typ Quad8 verwendet. Das Quad8-Element ist ein 8-knotiges Element mit quadratischer Ansatzfunktion. Es eignet sich besonders gut für Berechnungen mit nichtlinearen Materialien und mehrachsigen Belastungs- und Spannungszuständen.

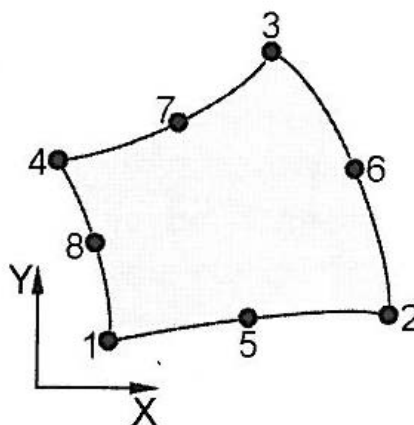


Abbildung 5-4: Definition Quad8-Element.

Wölbspnungen und Membraneffekte werden von Quad8-Elementen nicht korrekt erfasst. Dazu wären 9-knotige Lagrange-Elemente nötig. Diese werden vom Programm zwar auch zur Verfügung gestellt, erfordern aber einen erheblichen zusätzlichen Berechnungsaufwand. Es wird angenommen, dass diese Effekte keine großen Auswirkungen auf die Berechnung haben und daher der höhere Berechnungsaufwand nicht gerechtfertigt wäre.

Die Quad8-Elemente sind zwar Mittellinienelemente, d.h. sie liegen in der Mittenebene einer Platte/Schale, aber zur besseren Berücksichtigung der Plastizierung ist es möglich, die Schalen in Dickenrichtung in so genannte „Layer“ zu unterteilen. Für jeden Layer im Schalenelement wird die Spannung einzeln berechnet, es treten also über die Plattenhöhe variierende Spannungen auf. Dieses Verfahren ist zwar numerisch aufwendig, ist allerdings bei Kontaktproblemen bedeutend genauer als die ausschließliche Spannungsberechnung in Plattenmittelebene. Bei der vorliegenden Berechnung wurden die Quad8-Elemente in 10 Layer unterteilt.

5.2.4 Modellierung Glasaufleger

Das Glasaufleger selbst wirkt nicht direkt beim Lastabtrag mit. Es verteilt aber die Lasten auf die Schrauben und koppelt die Verformungen der Schrauben untereinander, d.h. die Schrauben zeigen alle am gleichen Punkt gleiche Vertikalverformungen.

Aus diesem Grund wird auf eine detailgetreue Modellierung des Glasauflegers verzichtet. Das Glasaufleger wird mit Hilfe sog. „Link“-Elemente vom Typ Rigid Link diskretisiert. Diese Link-Elemente koppeln die Translation der Schrauben miteinander, sodass keine unabhängigen Verformungen auftreten.

5.2.5 Modellierung des Kontaktproblems im Schraubkanal

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, Kontaktprobleme in *Straus7* zu modellieren: einmal mit Hilfe einer geometrischen Nichtlinearität über Point Contact-Elemente, sog. GAP-Elemente, und zum Zweiten mit Hilfe von nichtlinearem Materialverhalten über Cutoff Bar-Elemente.

Da ohnehin schon mit nichtlinearen Materialien gerechnet wird und um eine zusätzliche, numerisch aufwendige und fehleranfällige, geometrisch nichtlineare Berechnung zu vermeiden, wurden zur Modellierung des Kontaktproblems Cutoff Bar-Elemente gewählt.

Ein großer Unterschied in der Handhabung von Cutoff Bar-Elementen im Gegensatz zu GAP-Elementen ist, dass die Kontaktfläche zwischen den Körpern (in diesem Fall Schraube und Schraubkanal) nicht automatisch in Abhängigkeit von der Belastung berechnet wird, sondern vor Berechnungsbeginn definiert werden muss. In der vorliegenden Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Kontaktfläche zwischen Schraube und Schraubkanal eine Breite von 1mm hat.

Weiterhin wurden die Kontaktelemente so eingestellt, dass die mit hoher Steifigkeit eine unbegrenzt hohe Druckkraft übertragen können, aber bei Zug ausfallen. Überhaupt keine Zugkräfte in der Kontaktfuge zu übertragen führte zu numerischen Problemen bei der Berechnung. Deshalb wurden die Cutoff Bar-Elemente so manipuliert, dass in der Kontaktfuge eine geringe Zugkraft von 5N übertragen werden kann.

5.2.6 Einstellung des Solvers

Das Programm *Straus7* stellt verschiedene Solver für unterschiedliche Probleme wie z.B. transient dynamische Untersuchungen, Eigenwertanalysen und Beuluntersuchungen zur Verfügung. Es wurde der Solver für nichtlineare statische Analysen gewählt (Nonlinear Static Analysis) und die Option zur Berücksichtigung von Materialnichtlinearitäten aktiviert.

Der Solver nutzt ein modifiziertes *Newton-Raphson*-Verfahren zur Iteration. Um ein besseres Konvergenzverhalten bei ausreichender Genauigkeit zu erzielen, wurde eingestellt, dass die Gesamtsteifigkeitsmatix nur bei einer Änderung der normierten Verformung von 0,1, minimal aber aller 3 Iterationen neu berechnet wird. Der Lastvektor wird nach jeder Iteration neu berechnet. Nach maximal 20 Iterationen wird die Berechnung als nicht konvergent abgebrochen.

5.2.7 Zusammenfassung der Modelleigenschaften

Es folgt eine Zusammenstellung der verwendeten Elemente und ihrer Eigenschaften:

Tabelle 5-1: Schalenelemente.

Typ	Element	Material	E [MPa]	Nue [-]	t_{bend} [mm]	Yield Stress [Mpa]
Grundprofil	Quad8	S280	2,1E+5	3E-1	1,5	280
Schraubkanal	Quad8	S280	2,1E+5	3E-1	3	280

Tabelle 5-2: Stabelemente.

Typ	Element	Material	E [MPa]	Nue [-]	d [mm]
Gewinde	Beam2	Edelstahl	2,0E+5	3E-1	5
Schaft	Beam2	Edelstahl	2,0E+5	3E-1	4,5
Kopf	Beam2	Edelstahl	2,0E+5	3E-1	10,2

Tabelle 5-3: Kontaktelemente.

Typ	Element	Plane	Area [mm ²]	max. Compression [N]	max Tension [N]
Glasauflager	Rigid Link	XYZ	-	∞	∞
Kontakt	Pinned Link	-	-	∞	∞
Kontakt	Cutoff Bar	-	2	10.000	5

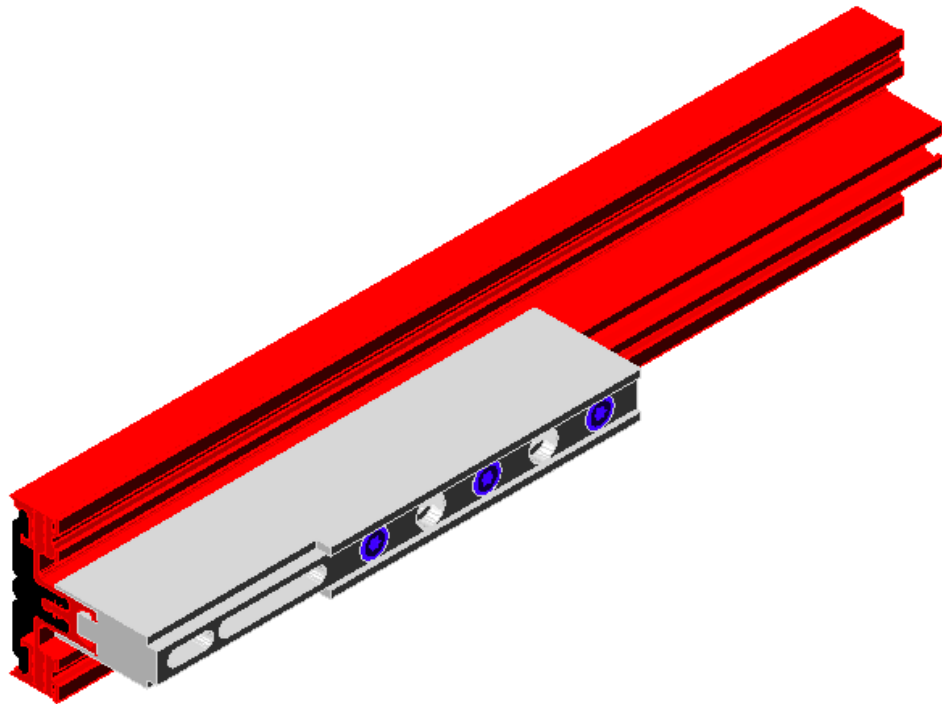


Abbildung 5-5: Glasaufleger, isometrische Darstellung mit Innendichtung (Versuch B5).

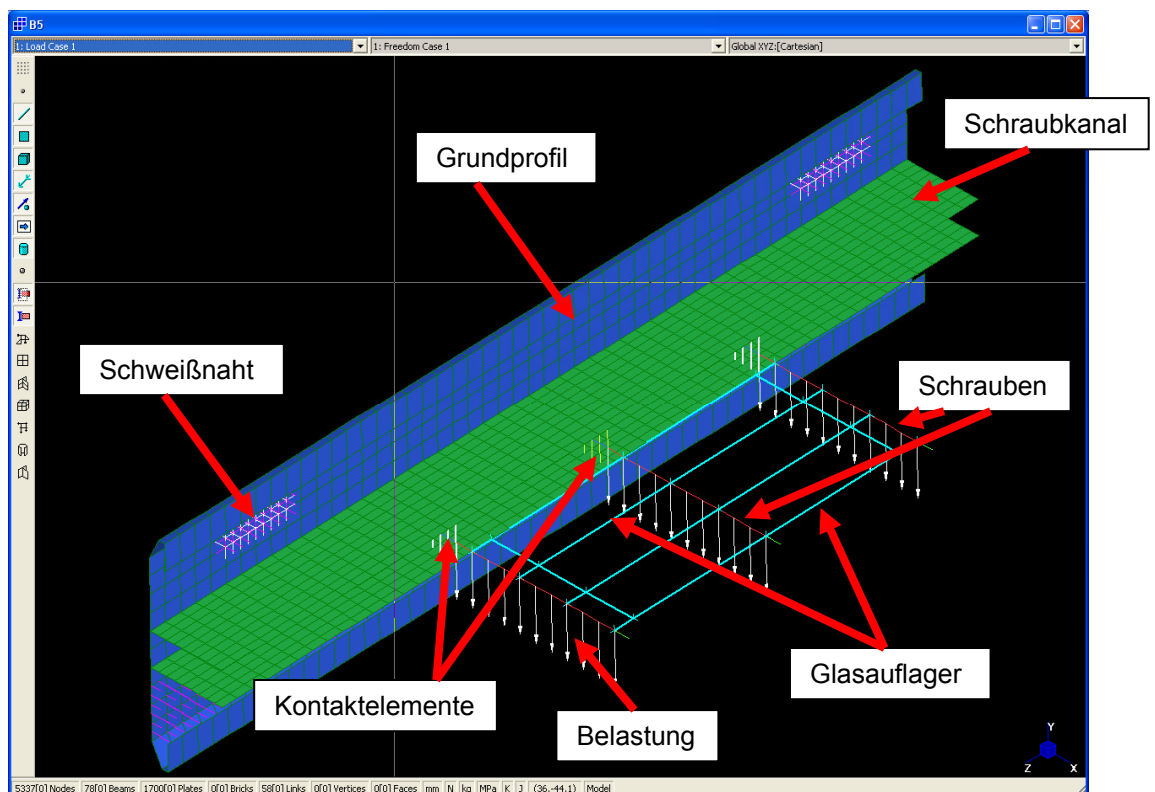


Abbildung 5-6: Finite-Elemente-Modell, Liniendarstellung (Versuch B5).

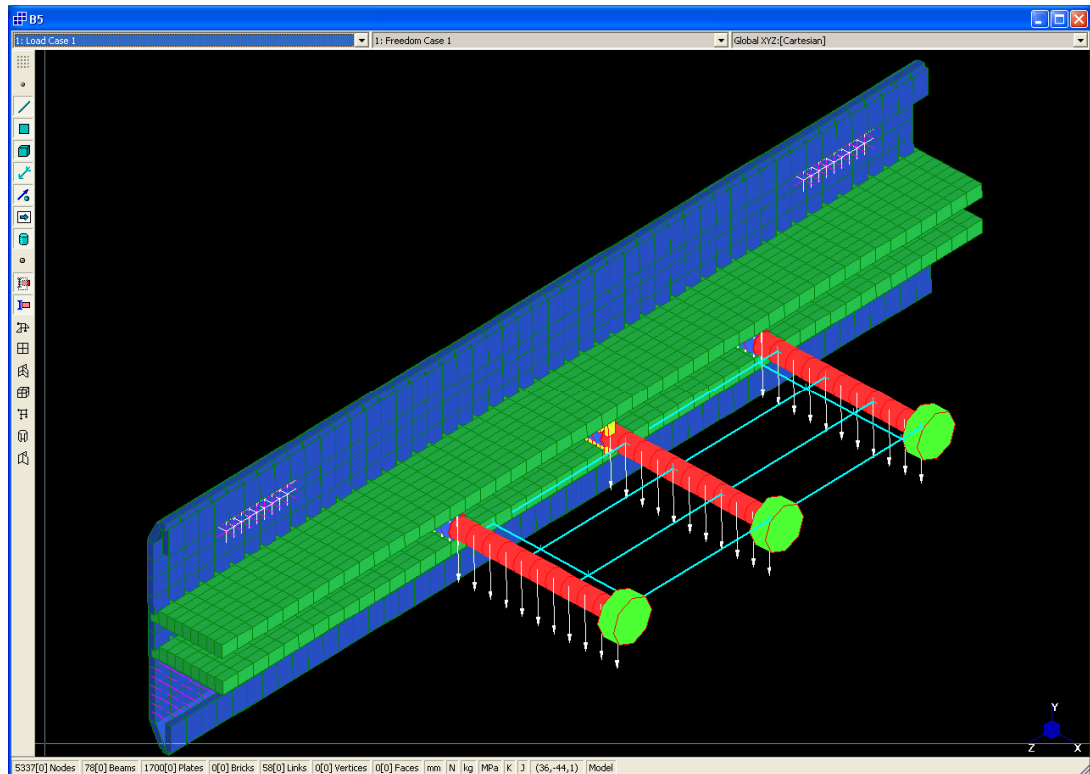


Abbildung 5-7: Finite-Elemente-Modell, gefüllte Darstellung (Versuch B5).

5.2.8 Grenzen einer Berechnung mit finiten Elementen

Numerische Simulationen sollten niemals mit der Realität verwechselt werden. Auch bei sorgfältigster Modellierung entsteht immer nur ein Modell. Die Finite-Elemente-Methode ist zwar ein sehr mächtiges Werkzeug, doch streng genommen ist sie nur ein Näherungsverfahren. Richtig kalibriert können anhand der Ergebnisse einer Modellrechnung aber viele nützliche Rückschlüsse auf die Realität gezogen werden.

Im vorliegenden Modell werden sowohl Membraneffekte als auch die Wölbkrafttorsion vernachlässigt. Streuungen der Materialeigenschaften, wie z.B. beim E-Modul und der Fließgrenze, örtliche Verfestigungen sowie Eigenspannungen aufgrund des Walzprozesses können nicht berücksichtigt werden. Weiterhin wurden Abweichungen in der Materialgeometrie über die Länge des untersuchten Abschnittes nicht berücksichtigt. Das Kontaktproblem zwischen Belastungsschwert und Glasaufleger wurde aus Rücksicht auf die Rechenzeit nicht abgebildet. Dies kann trotz ansonsten realitätsnaher Modellierung zu Abweichungen zwischen Simulation und Experiment führen.

Weiterhin können Abweichung bei der Bestimmung der Messpunkte W1 bis W4 aufgrund der Hebelgesetze zu Abweichungen führen. All dies ist bei der Interpretation der Simulationsergebnisse zu beachten.

5.3 Darstellung der Ergebnisse

5.3.1 Übersicht über die Ergebnisse

Mit Hilfe der oben beschriebenen Parameter wurden alle in Abschnitt 4 beschriebenen Versuche mit der FEM nachgebildet. Um die Ergebnisse der FE-Berechnung sowohl qualitativ (Verlauf der Last-Verformungskurve) als auch quantitativ (zahlenmäßige Übereinstimmung) mit den Versuchsergebnissen vergleichbar zu machen, wurde die Last im FE-Modell auch inkrementell bis zur Maximallast gesteigert. Um einen ausreichend fein abgestuften Graphen aus der FE-Berechnung zu erhalten, wurde für jeden Versuch die Last in 20 Inkrementen bis zur Maximallast gesteigert.

Die folgende Tabelle vergleicht die Versuchs- und Simulationsergebnisse hinsichtlich der erreichten Kraft je Schraube bei 1mm Glasauflagerverformung.

Tabelle 5-4: Vergleich zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen.

Versuch	$\overline{F_{1Exp}}$ je Schraube[N]	$\overline{F_{1Exp}}$ gesamt [N]	$\overline{F_{1FEM}}$ je Schraube [N]	$\overline{F_{1FEM}}$ gesamt [N]	Ratio Exp./FEM
B1	925	3700	810	3240	1,14
B2	580	3500	570	3420	1,02
B3	410	4100	400	4000	1,02
B4	640	2250	425	1700	1,51
B5	450	2750	340	2040	1,32
B6	210	2100	245	2450	0,86
C1	1125	4500	1010	3500	1,11
C2	750	4500	720	4320	1,04
C3	430	4300	480	4800	0,90
C4	600	2400	570	2300	1,05
C5	420	2500	415	2490	1,01
C6	300	3000	320	3200	0,94

Die Verläufe der simulierten Last-Verformungskurven im Vergleich zu den bei den Versuchen aufgenommenen Kurven werden auf den folgenden Abbildungen dargestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse aus Tabelle 5-4 in ein 3D-Diagramm zusammengefasst.

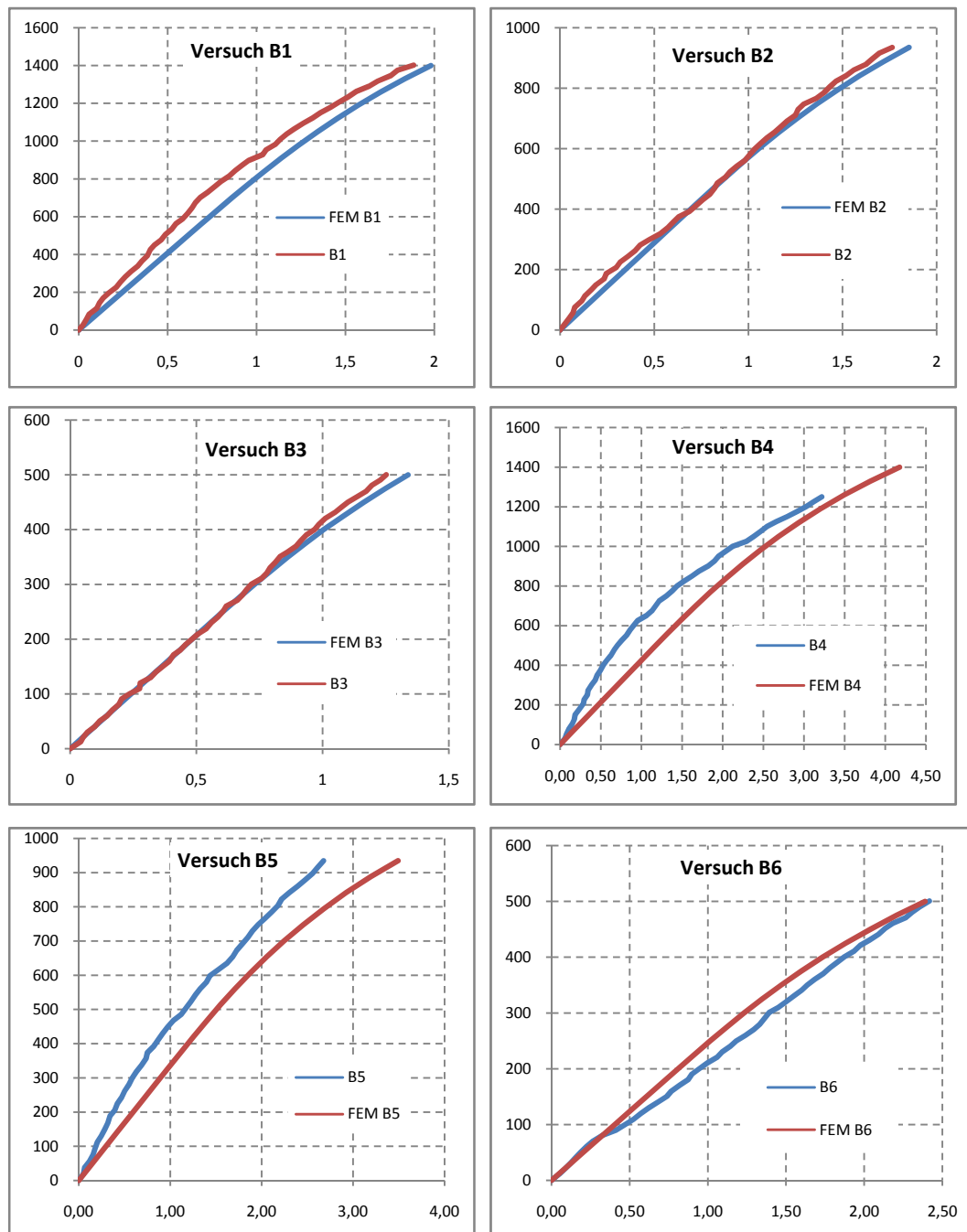


Abbildung 5-8: Vergleich der Last-Verformungskurven Serie B. Abszisse: Verformung des Glasauflegers in [mm]. Ordinate: Kraft je Schraube in [N].

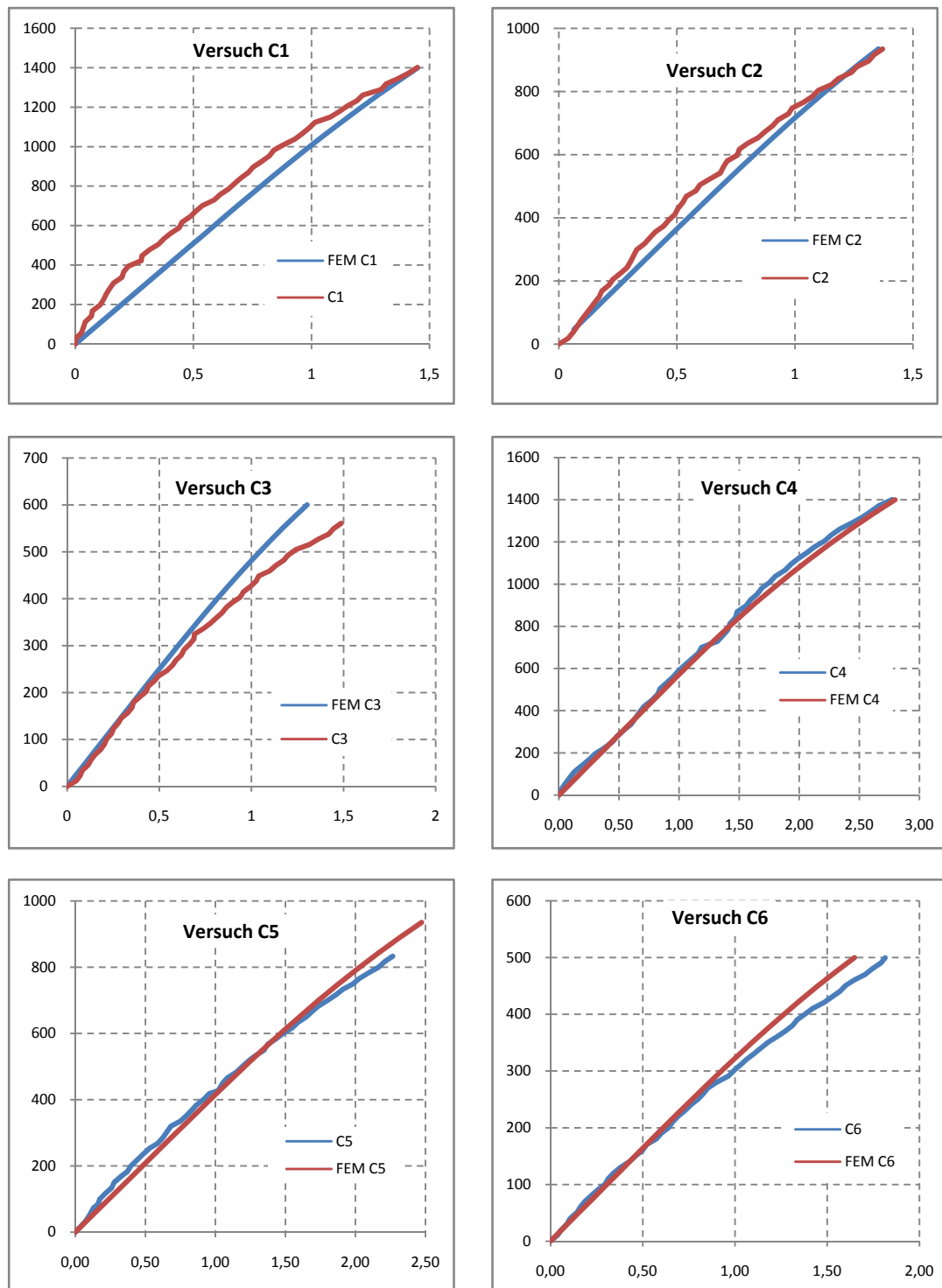


Abbildung 5-9: Vergleich der Last-Verformungskurven Serie C. Abszisse: Verformung des Glasaufagers in [mm]. Ordinate: Kraft je Schraube in [N].

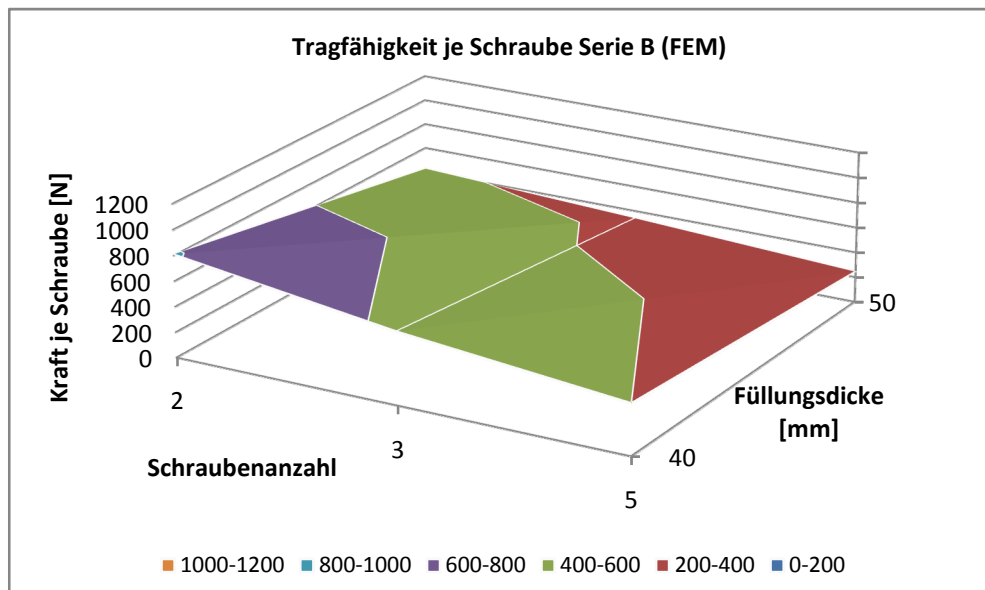


Abbildung 5-10: Simulationsergebnisse Serie B.

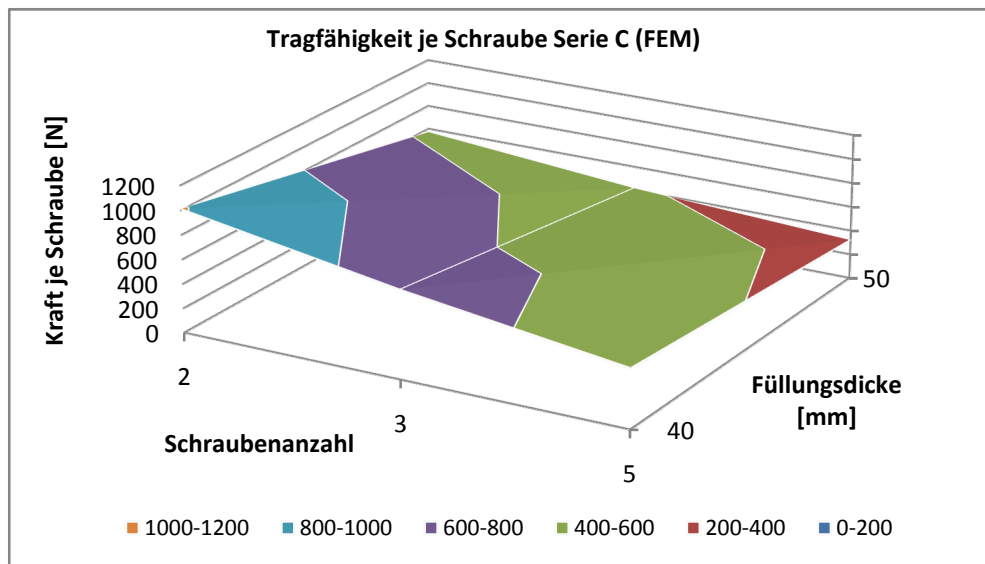


Abbildung 5-11: Simulationsergebnisse Serie C.

Die vorangegangenen Darstellungen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen. Qualitativ stimmen die Kurvenverläufe bei allen Versuchen überein, quantitativ weichen die Simulationsergebnisse teilweise stark ab. Mögliche Gründe dafür wurden im Abschnitt 5.2.8 erläutert. Im Großen und Ganzen kann aber davon ausgegangen werden, dass durch die erstellten Finite-Elemente-Modelle die Verhältnisse am Glasaufleger realistisch wiedergegeben werden. Die gewählten Element- und Solvereinstellungen sind als tauglich anzusehen.

5.3.2 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Füllungsdicke

Erwartungsgemäß fällt die bis zum gewählten Gebrauchstauglichkeitskriterium erreichte Last analog zu den Experimenten bei den Varianten mit 50mm Füllungsdicke geringer aus als bei den Varianten mit 40mm Füllungsdicke.

Tabelle 5-5: Aufgenommene Kräfte im Verhältnis der Füllungsdicken (Simulation).

B4/B1	B5/B2	B6/B3	C4/C1	C5/C2	C6/C3
0,52	0,59	0,61	0,56	0,58	0,67

Mittelwert: 0,59

Zum Vergleich Mittelwert bei den Experimenten: 0,63.

Die Mittelwerte zwischen Simulationsergebnissen und experimentell ermittelten Werten liegen nahe beieinander, was man wiederum als Indiz für eine Korrelation zu dem quadratischen Verhältnis der Füllungsdicken sehen könnte. Dagegen ist aber einzuwenden, dass auch bei den Simulationsergebnissen die Verhältnisse sehr stark streuen. Es kann deshalb nur die Aussage aus Abschnitt 4.3.2 wiederholt werden, dass um genaue Aussagen über den Einfluss der Füllungsdicke treffen zu können, Ergebnisse aus weiteren Variantenstudien nötig sind.

5.3.3 Abhängigkeit der Tragfähigkeit vom Schraubenabstand

Das Anordnen von weiteren Schrauben im Schraubkanal und damit einer Verkleinerung der Schraubenabstände wirkt sich analog zu den Versuchen nachteilig auf die Steifigkeit aus, wobei die Minderung tendenziell bei den FE-Simulationen geringer ausfällt. Der Bereich der Einflussbreiten und deren Überschneidung sind in den Ergebnissen der Simulation sehr gut zu erkennen.

Weiterhin ist bei der Laststeigerung eine Lastumlagerung von den inneren Schrauben auf die äußeren zu beobachten. Die inneren Schrauben entziehen sich wegen der geringeren Einspannwirkung des Schraubkanals der Lastaufnahme und die Last verlagert sich über das Glasaufleger in die steifer reagierenden äußeren Schrauben. Durch diese erhöhte Belastung biegt sich wiederum der Schraubkanal an dieser Stelle mehr auf und die inneren Schrauben werden wieder mehr belastet. Auf diese Weise stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem die äußeren Schrauben einen größeren Lastanteil tragen, als die inneren Schrauben.

Um die Steifigkeit der Einspannung der Schrauben und damit deren Tragfähigkeit zu erhöhen, bietet es sich an, den Schraubkanal zwischen den Schrauben zu verschweißen oder den Schraubenabstand zu erhöhen.

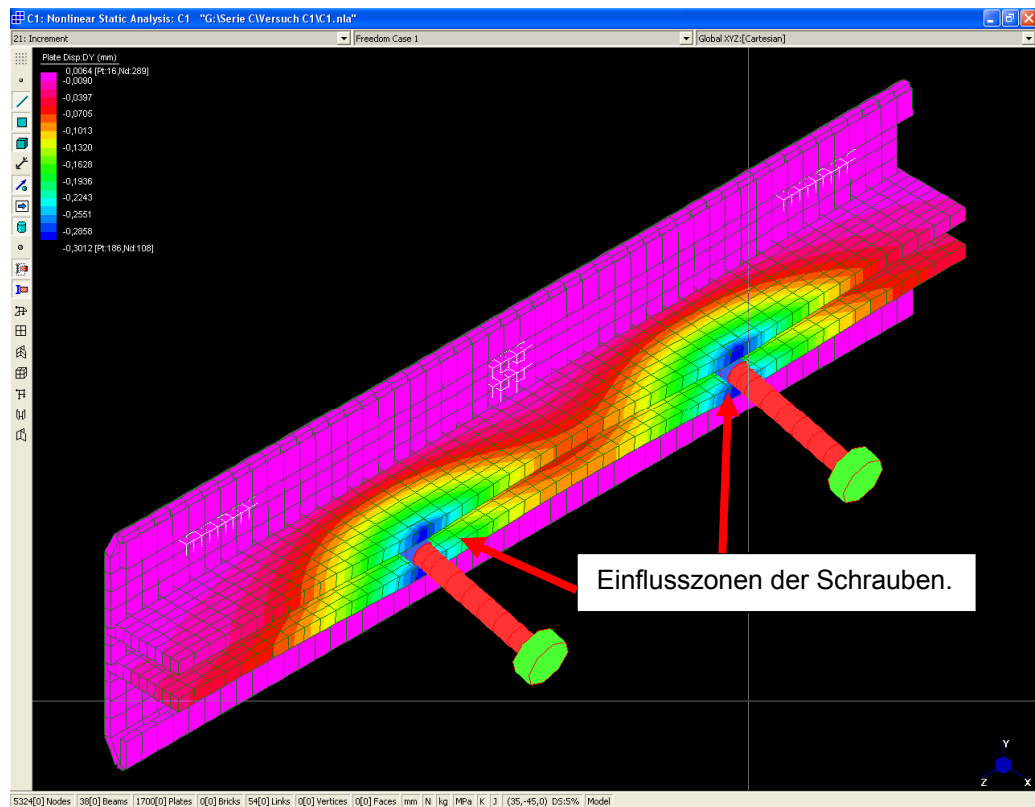


Abbildung 5-12: Verformungen DY Simulation C1.

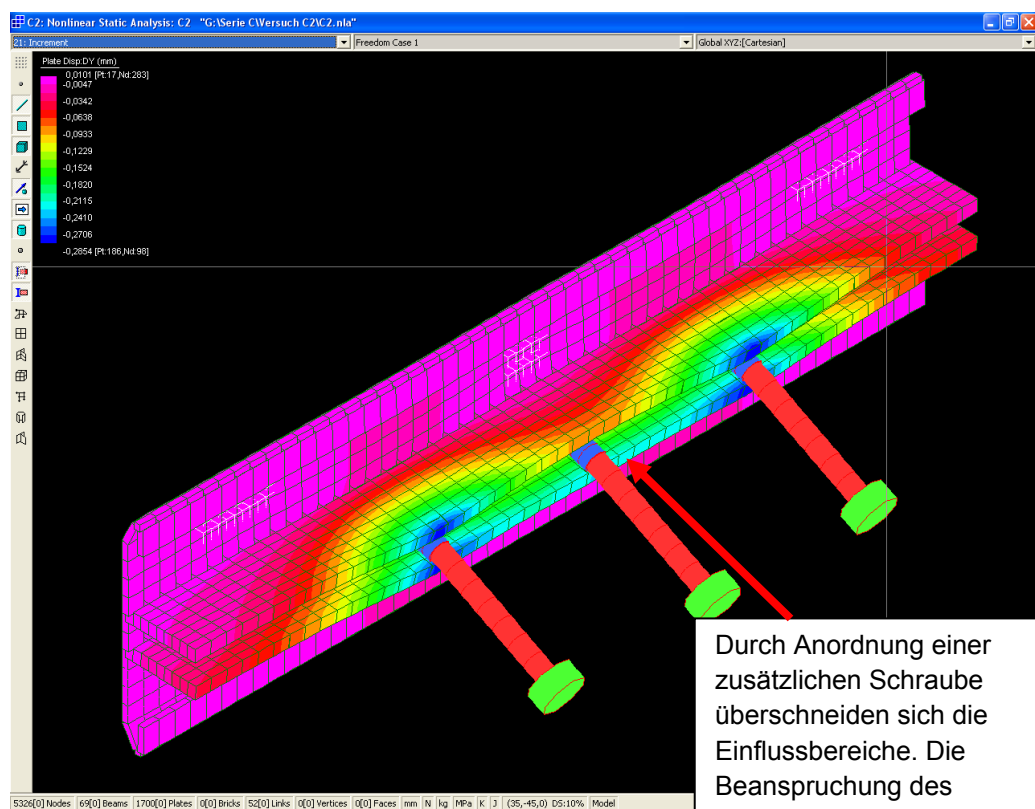


Abbildung 5-13: Verformungen DY Simulation C2.

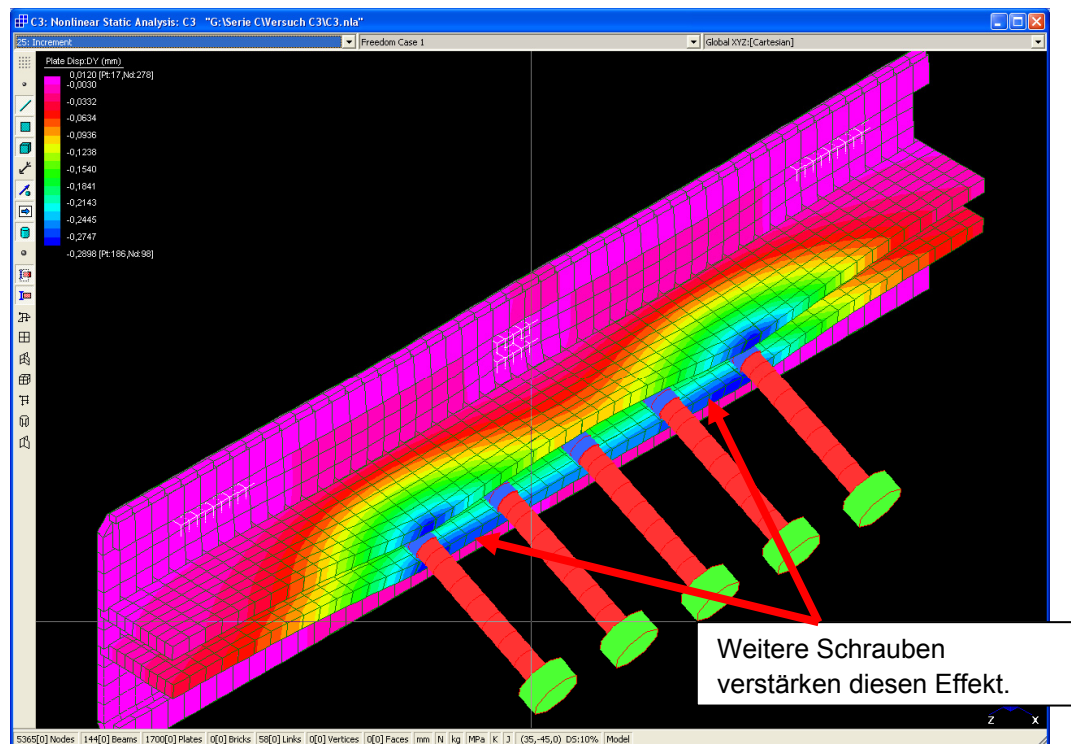


Abbildung 5-14: Verformungen DY Simulation C3.

Tabelle 5-6: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und drei Schrauben je Glasaufleger).

B2/B1	B5/B4	C2/C1	C5/C4
0,70	0,80	0,71	0,72

Mittelwert: 0,73

Zum Vergleich Mittelwert bei den Experimenten: 0,67

Tabelle 5-7: Abhängigkeit von der Schraubenanzahl (Vergleich von zwei und fünf Schrauben je Glasaufleger).

B3/B1	B6/B4	C3/C1	C6/C4
0,49	0,57	0,47	0,56

Mittelwert: 0,52

Zum Vergleich Mittelwert bei den Experimenten: 0,41

5.3.4 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Profilverdrehung

Die Wirkung des Schweißpunktes in den Simulationen ist analog zu der aus den durchgeführten Versuchen. Der Schweißpunkt über dem Glasaufleger verhindert die Verdrehung des Grundprofils, die Konstruktion mit zusätzlichem Schweißpunkt reagiert im Durchschnitt um ca. 25% steifer als die ohne zusätzlichen Schweißpunkt.

Eine durchaus überraschende Erkenntnis bei der Auswertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Profilverdrehung war, dass die Gesamtverformung an der Glasauflegerspitze *nur mit einem sehr geringen Anteil von der Schraubenbiegung abhängig* ist. Den größten Einfluss auf die Steifigkeit der Konstruktion haben Grundprofilverdrehung und Biegung des Schraubkanals.

Gründe dafür sind zum einen, dass kleine Verformungen an diesen Stellen aufgrund der Hebelwirkung große Auswirkungen an der Glasauflegerspitze haben. Ein weiterer Grund für den geringen Einfluss der Schraubenbiegung auf die Gesamtverformung ist die Behinderung der freien Verformung durch das Kunststoffglasaufleger. Auf der Länge, auf welcher das Glasaufleger an der Schraube anliegt, bleibt die Schraube gerade, nur im Bereich der Innendichtung ist eine freie Verformung möglich.

Tabelle 5-8: Abhängigkeit von der Profilverdrehung.

C1/B1	C2/B2	C3/B3	C4/B4	C5/B5	C6/B6
1,25	1,26	1,20	1,34	1,22	1,31

Mittelwert: 1,26

Zum Vergleich Mittelwert bei den Experimenten: 1,25

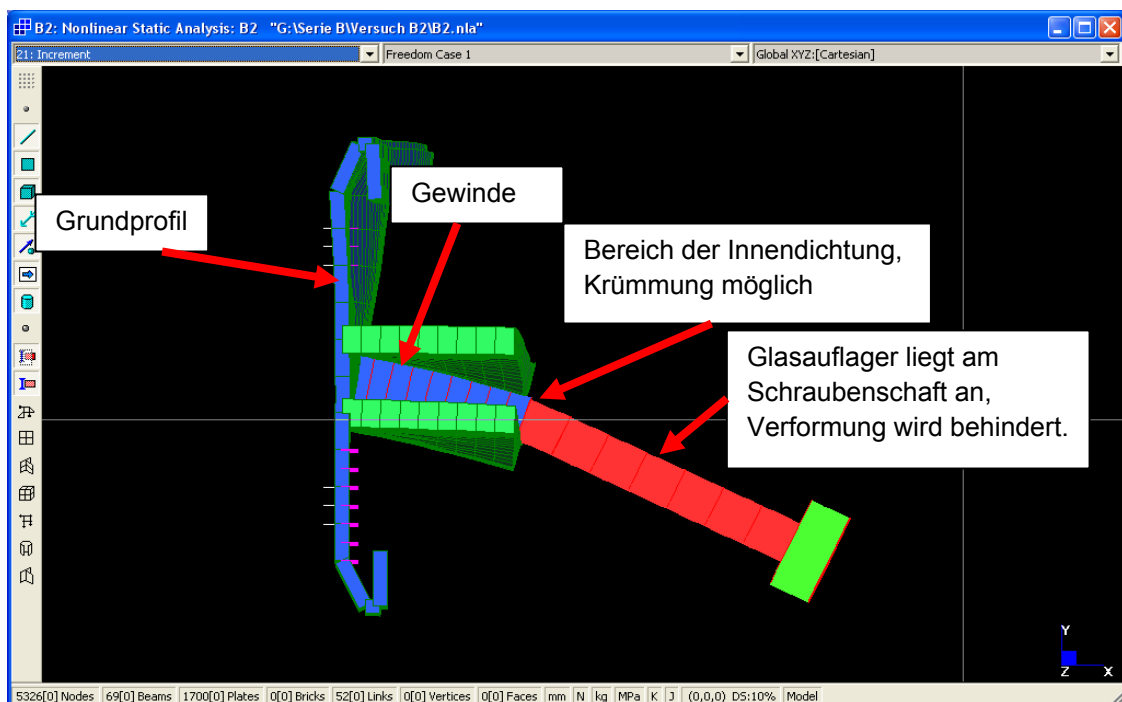


Abbildung 5-15: Vertikalverformung Versuch B2, überhöhte Darstellung.

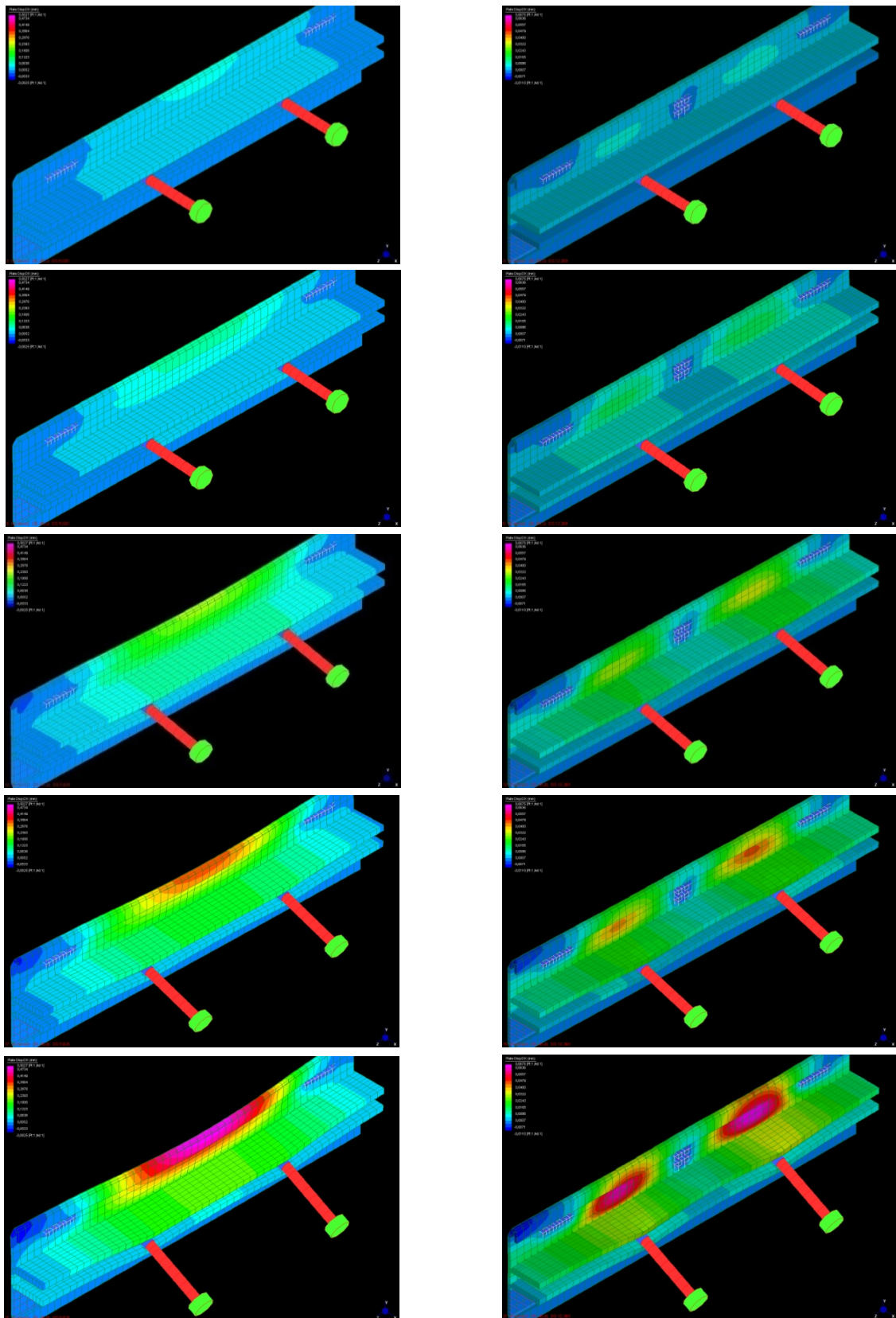


Abbildung 5-16: Vergleich der Simulationen B1 und C1 hinsichtlich der Grundprofilverdrehung.

Dargestellt wird in Abbildung 5-17 die Verformung in Richtung DX bei verschiedenen Lastinkrementen. Es wird dabei deutlich, wie sich die Verdrehung des Grundprofils und der Schweißpunkt über dem Glasaufleger auf die Gesamtverformung auswirkt.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass eine Simulation des Tragverhaltens der Glasauflegerkonstruktion des Stahl-Aufsatzfassadensystems *esco Ferro-Wictec 55-1E* mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode unter Benutzung des FE-Programmes *Straus7* möglich ist. Die Versuchsergebnisse sind in die Auswahl der verwendeten Elemente und deren Eigenschaften eingegangen. Es wurden weiterhin die benötigten Elementeeigenschaften zusammengestellt.

Das mit Hilfe der in Abschnitt 5.2 definierten Parameter erstellte Finite-Elemente-Modell zeigt eine sehr gute qualitative und eine ausreichende quantitative Übereinstimmung mit den in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen und durchgeführten Bauteilversuchen, wie anhand von vergleichenden Diagrammen nachgewiesen wurde. Bis auf zwei Ausnahmen verliefen die aus dem FE-Modell gewonnenen Last-Verformungskurven unterhalb der versuchstechnisch ermittelten Last-Verformungskurven.

Bezüglich der Abhängigkeit der Tragfähigkeit von den Schraubenabständen wurde durch die FE-Simulation die These bestätigt, dass durch die Überschneidung der Einflussbereiche und der damit einhergehenden Beanspruchungsvergrößerung des Schraubkanals die Tragfähigkeit je Glasauflegerschraube sinkt. Weiterhin wurde festgestellt, dass es im Verlauf der Laststeigerung zu einer Kraftumlagerung von den inneren Schrauben zu den äußeren Schrauben hin kommt, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den Verformungen ausbildet. Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit und Tragfähigkeit sind Verschweißen des Schraubkanals zwischen den Glasauflegerschrauben oder Vergrößerung des Schraubenabstandes.

Die Verdrehung des Grundprofils beeinflusst das Tragverhalten maßgeblich, eine zusätzliche Befestigung über dem Glasaufleger, welche diese Verdrehung verhindert, führte bei den untersuchten Varianten zu einer um 25% erhöhten Steifigkeit. Diese aus den Bauteilversuchen gewonnene Erkenntnis wurde durch die FE-Simulationen bestätigt.

Die Bolzenbiegung, in diesem Fall Biegung der Schrauben, spielte bei den untersuchten Varianten nur eine untergeordnete Rolle. Grund dafür ist, dass das Kunststoffglasaufleger die Krümmung der Schrauben verhindert. Eine größere Füllungsstärke und damit Schraubenlänge führt hauptsächlich wegen des vergrößerten Hebelarms zu einer geringeren Steifigkeit.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Tragmodell und Gebrauchstauglichkeit

In dieser Arbeit wurde das Last-Verformungsverhalten von ausgesuchten Varianten der Glasauflegerkonstruktion des Stahl-Aufsatzfassadensystems *esco Ferro-Wictec 55-1E* untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Gesamtverformung am Glasaufleger aus vom Fassadensystem abhängigen und unabhängigen Verformungskomponenten zusammensetzt.

Vom gewählten Fassadensystem unabhängig ist die Verformung der Unterkonstruktion, zusammengesetzt aus:

- Verformung und Verdrehung des Riegels,
- Verformung und Verdrehung aufgrund der Nachgiebigkeit der T-Verbindung,
- Verformung der Pfosten.

Im Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die Verformung der Unterkonstruktion ausreichend genau mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Baustatik berechnet werden kann.

Als vom betrachteten Fassadensystem *esco Ferro-Wictec 55-1E* abhängige Verformungskomponenten wurden angenommen:

- Verformung der Schraube,
- Verformung (Aufbiegen) des Schraubkanals,
- Verformung (Verdrehung) des Grundprofils,
- Steifigkeit und Anordnung der Verbindungen zwischen Grundprofil und Unterkonstruktion.

Auf die Abhängigkeit von Art und Anordnung der Verbindungsmittel wurde in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Es wurde festgestellt, dass die Biegung des Schraubkanals und die Verdrehung des Grundprofils einen maßgebenden Einfluss auf das Tragverhalten haben. Durch das Auswerten der FE-Simulationen wurde weiterhin festgestellt, dass die Schraubenbiegung nur eine untergeordnete Rolle spielt, da sie durch das anliegende Kunststoffglasaufleger weitestgehend verhindert wird.

Die Biegung des Schraubkanals wird nachteilig von geringen Schraubenabständen beeinflusst. Durch eng nebeneinander liegende Schrauben wird die zweiachsige Beanspruchung vergrößert, was zu einer abnehmenden Steifigkeit der Einspannung der Schrauben im Schraubkanal führt.

Aufgrund der komplexen Tragwirkung des Glasaufagers wurde vorgeschlagen, die Glasaufagerverformung wie folgt zu berechnen:

$$f_{z, \text{Glasauflager}} = F * c_{GA} \quad (6-1)$$

Die Federkonstante c_{GA} ist dabei aus Bauteilversuchen zu bestimmen. Aufgrund der durchgeführten Bauteilversuche und ausgewerteten FE-Simulationen wird vorgeschlagen, die Federkonstante c_{GA} je Glasaufager für das System *esco Ferro-Wictec 55-1E* wie folgt abzuschätzen:

$$c_{GA} = \left[\eta * \left(\frac{40}{FD} \right)^2 * 3,5 \right]^{-1} \text{ in [mm/kN]} \quad (6-2)$$

mit

$\eta = 1,0$ für keinen zusätzlichen Schweißpunkt über dem Glasaufager

$\eta = 1,25$ für einen zusätzlichen Schweißpunkt über dem Glasaufager

FD Füllungsdicke in [mm].

Tabelle 6-1: Vergleich der ermittelten Werte für c_{GA} .

Versuch	$\overline{c_{GA,Exp}}$	$c_{GA,FEM}$	$c_{GA,Formel}$	Ratio Exp./Formel	Ratio FEM/Formel
B1	0,27	0,31	0,29	0,93	1,07
B2	0,29	0,29	0,29	1,00	1,00
B3	0,24	0,25	0,29	0,83	0,86
B4	0,39	0,59	0,45	0,87	1,31
B5	0,36	0,49	0,45	0,80	1,09
B6	0,48	0,41	0,45	1,07	0,91
C1	0,22	0,29	0,23	0,96	1,26
C2	0,22	0,23	0,23	0,96	1,00
C3	0,23	0,21	0,23	1,00	0,91
C4	0,42	0,43	0,36	1,17	1,19
C5	0,40	0,40	0,36	1,11	1,11
C6	0,33	0,31	0,36	0,92	0,86

Wie aus Tabelle 6.1 zu ersehen ist, liegt der nach Formel 6-2 ermittelte Schätzwert in nahezu allen Fällen auf der sicheren Seite. Die Übertragbarkeit auf andere Füllungsdicken und vor allem auf verschiedene Isolierglasaufbauten ist noch durch weitere Versuche zu überprüfen.

Es wurde auch festgestellt, dass noch keine theoretisch begründeten bzw. bauaufsichtlich eingeführten Regelungen für die Gebrauchstauglichkeit von Glasauflagern existieren. Bei der Festlegung eines Gebrauchstauglichkeitskriteriums sollten folgende vier Punkte berücksichtigt werden:

1. Belastbarkeit und Dauergebrauchstauglichkeit des Randverbundes,
2. Belastung der Glaskanten,
3. Belastung des Glasklotzes,
4. Vermeiden von Kontakt Metall-Glas.

Um die ersten drei Punkte berücksichtigen zu können, sind noch weitere Forschungen nötig. Belastbare Erkenntnisse zu diesem Thema konnten auch nach ausgiebiger Literaturrecherche nicht gefunden werden.

Um den vierten Punkt zu berücksichtigen, sind genaue Kenntnisse der Einbausituation notwendig. Für den Fall, dass das System *esco Ferro-Wictec 55-1E* verwendet wird, alle anderen Einbaubedingungen aber unbekannt sind (Toleranzen, Verformung benachbarter Füllungselemente etc.) wurde festgestellt, dass ein Grenzwert für die Gesamtdurchbiegung von $f_{\max}=1\text{mm}$ ein geeignetes Gebrauchstauglichkeitskriterium darstellt.

6.2 Versuchsbestimmte Tragfähigkeit der Glasauflager

Es wurde in dieser Arbeit ein möglicher Versuchsaufbau zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Glasauflagern vorgestellt. Dieser hat den Vorteil, dass die Bauteilversuche mit einfachen Mitteln sowie geringem Materialaufwand durchführbar sind und man relativ schnell eine große Anzahl aussagekräftiger Ergebnisse erzielen kann. Das in Kapitel 4 dieser Arbeit beschriebene Versuchsprogramm konnte mit der gewählten Methode erfolgreich durchgeführt werden.

Nachteilig sind die zeitaufwendige und fehleranfällige Kleinarbeit zum Einrichten der Messmittel und die Festlegung auf ein bestimmtes Format der Prüfkörper. Aufgrund des geringen Platzes unter dem Riegelprofil konnten dort nur analoge Messmittel appliziert werden, woraus wegen des schwierigen Ablesens eine weitere Fehlerquelle entsteht.

Es muss auch geklärt werden, inwieweit die Ergebnisse aus diesem Versuchsaufbau auf Isolierglaseinheiten übertragen werden können, besonders in Bezug auf die Lastverteilung. Auch das Langzeitverhalten der Glasauflager kann mit diesem Versuchsaufbau nicht geklärt werden.

6.3 Vergleich mit den bestehenden Verarbeitungsrichtlinien

Die Verarbeitungsrichtlinien [17] stufen die Tragfähigkeit je Schraube ausschließlich nach Schraubenlänge ab. Vergrößert man die Anzahl der Schrauben je Glasaufleger, vergrößert sich nach [17] auch die Tragfähigkeit des Glasauflegers.

Die Tragfähigkeit je Schraube bis zum Erreichen einer maximalen Verformung von 1mm ergibt sich nach [17] zu:

- 350N bei einer Füllungsdicke bis max. 40mm,
- 250N bei einer Füllungsdicke bis max. 46mm,
- 200N bei einer Füllungsdicke bis max. 52mm.

Im Vergleich zu den errechneten und bei den Bauteilversuchen erreichten Werten, stellt man fest, dass diese Annahmen stark konservativ sind und vom schlechtesten Fall mit 5 Schrauben je Glasaufleger ausgehen.

Tabelle 6-2: Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse mit [17].

Versuch	Tragfähigkeit je Schraube nach [17] in [N]	Tragfähigkeit je Schraube aus Versuchen in [N]	Tragfähigkeit je Schraube aus Simulationen in [N]
B1	350	925	810
B2	350	580	570
B3	350	410	400
B4	200	640	425
B5	200	450	340
B6	200	210	245
C1	- ¹²	1125	1010
C2	-	750	720
C3	-	430	480
C4	-	600	570
C5	-	420	415
C6	-	300	320

¹² Die Konfiguration mit Schweißpunkt über dem Glasaufleger ist für die geschraubte Glasauflegervariante in den Verarbeitungsrichtlinien nicht vorgesehen.

Zur Vereinfachung der Angaben in den Verarbeitungsrichtlinien und zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit wird folgender Vorschlag gemacht:

- Es wird auf die Varianten mit 2, 4 und 5 Schrauben je Glasaufleger verzichtet. **Es werden ausschließlich 3 Schrauben je Glasaufleger verwendet.**
- Maximale Belastung 580N je Schraube für Füllungsdicken $\leq 40\text{mm}$.
- Maximale Belastung 400N je Schraube für Füllungsdicken $\leq 50\text{mm}$.

Mit diesen Regelungen kann im Füllungsdickenbereich bis 40mm das gleiche Spektrum abgedeckt werden wie bisher. Für den Füllungsdickenbereich $> 40\text{mm}$ wird die zulässige Belastung erhöht. Ein weiterer Vorteil des Vorschlags ist, dass Fehler beim Verarbeiter durch die Einschränkung der Variantenanzahl vermieden werden.

6.4 Optimierungsvorschläge für die bestehende Konstruktion

Die vorangegangenen Betrachtungen haben gezeigt, dass die Verformung des Glasaufagers maßgeblich von der Biegung des Schraubkanals und der Verdrehung des Grundprofils zwischen den Schweißpunkten hinweg abhängt.

Negativ beeinflussen die Schraubkanalbiegung eine Erhöhung der Glasaufлагerschraubenanzahl und damit einhergehend geringe Abstände der Glasaufлагerschrauben. Es wird daher empfohlen, die Anzahl der Glasaufлагerschrauben auf drei zu beschränken *und* die Schraubenabstände zu erhöhen (vgl. Ausführungen im vorhergehenden Abschnitt). Dies bringt wirtschaftliche Vorteile durch eine Vereinfachung der Konstruktion mit sich (vgl. Abschnitt 6.3) und erhöht deren Steifigkeit.

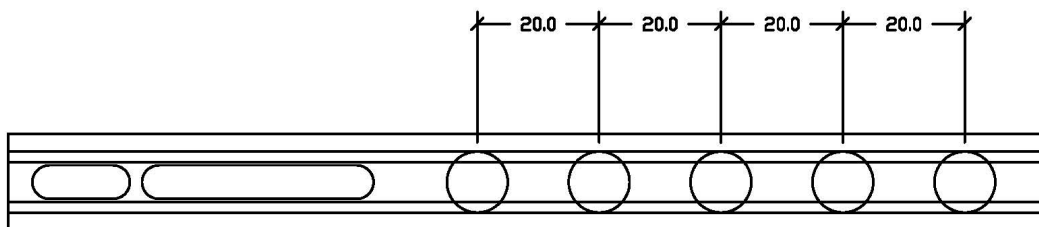


Abbildung 6-1: Bestehende Glasauflagerkonstruktion.

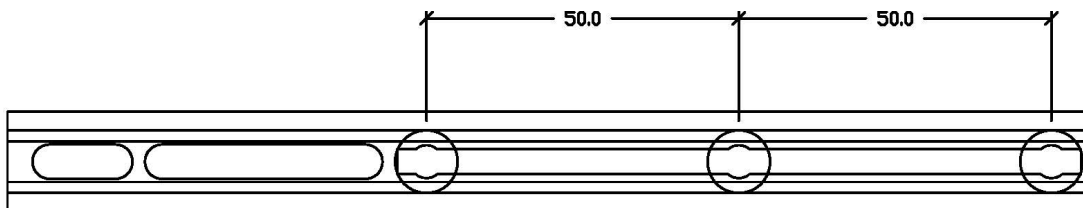


Abbildung 6-2: Vorgeschlagene Glasauflagerkonstruktion.

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag ist, auf die Variante mit eingeschweißtem Edelstahlswert gänzlich zu verzichten. Wie die Versuche ergeben haben, kann durch eine Behinderung der Profilverdrehung mit Hilfe des zusätzlichen Schweißpunktes über dem Glasauflager eine Tragfähigkeit von bis zu 5kN (bezogen auf das Gesamtfüllungsgewicht) schon mit der bestehenden geschraubten Variante erreicht werden. Optimal wäre eine Kombination aus Erhöhung der Schraubenabstände und dem zusätzlichen Schweißpunkt.

6.5 Ausblick und Schluss

In dieser Arbeit konnten aufgrund einer analytischen Betrachtung des Bauteils Glasaufleger, darauf folgender Bauteilversuche und einer an den Bauteilversuchen kalibrierten FE-Simulation Hinweise zur Verbesserung einer bestehenden Glasauflegerkonstruktion gegeben werden. Alle drei im Abschnitt 1.2 dieser Arbeit gesteckten Ziele wurden erreicht:

- 1) Der Aufbau und das Lastabtragungsverhalten einer systemspezifischen Glasauflegerkonstruktion wurde im theoretischen Teil untersucht. Dabei wurde im Besonderen geklärt, von welchen Einflussfaktoren das Verformungsverhalten abhängig ist. Einige Beziehungen zur Verformungsberechnung wurden zusammengestellt.
- 2) Anhand von Bauteilversuchen wurde qualitativ und quantitativ untersucht, wie vom betrachteten Fassadensystem abhängige Faktoren das Verformungsverhalten beeinflussen.
- 3) Mit Hilfe der Versuchsergebnisse wurde ein Finite-Elemente-Modell kalibriert.

Dies zeigt, dass die gewählte Vorgehensweise für diesen Zweck geeignet war.

Es konnte gezeigt werden, welche Vorteile Rechensimulation bei der Bauteilentwicklung auch im Bauwesen hat. Denn während in anderen Branchen, z.B. dem Automobil- und Flugzeugbau, von dieser Möglichkeit schon lange Gebrauch gemacht wird, findet die FEM bei der Bauteilentwicklung im Bauwesen nur wenig Beachtung. Auch in Zukunft sollte z.B. das Bauteil Glasaufleger mit Hilfe von rechnergestützten Simulationen weiter optimiert werden. Dabei kann z.B. auf Erkenntnisse aus dieser Arbeit zurückgegriffen werden.

Das bedeutet nicht, dass in Zukunft auf Bauteilversuche gänzlich verzichtet werden kann. Es wurde in dieser Arbeit auch deutlich, dass mit Hilfe der FEM nicht alle in der Realität auftretenden Phänomene berücksichtigt werden können. Das Experiment wird weiterhin zur Validierung der Simulation dienen.

Aus den Überlegungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit wurde auch deutlich, welcher Forschungsbedarf noch in den Gebieten Interaktion Glas/Glasauflager und Schertragfähigkeit des Randverbundes besteht.

Aufgrund der geringen Quellenanzahl zu diesem Thema lässt sich feststellen, dass dem Glasaufleger bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Das Glasaufleger mag nur ein kleines Bauteil in der Fassadenkonstruktion sein, aber mit großer Bedeutung: Es trägt die Verglasung, das visuelle Hauptelement einer Pfosten-Riegel-Fassade.

Wegen dieser Bedeutung sollte der Glasauflegerkonstruktion in Zukunft bei allen an Produktentwicklung und Bauausführung Beteiligten mehr Beachtung geschenkt werden.

7 Literaturverzeichnis

Normen, Vorschriften und Richtlinien

- [1] DIN 1080-1: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen; Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 1976-06.
- [2] DIN 18800-1: Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Beuth-Verlag, Berlin, 2008-11.
- [3] DIN EN 10326: Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Baustählen - Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10326:2004. Beuth Verlag, Berlin, 2004-09.
- [4] DIN EN 13830: Vorhangfassaden - Produktnorm; Deutsche Fassung EN 13830:2003. Beuth Verlag, Berlin, 2003-11.
- [5] DIN EN ISO 3506-1: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen - Teil 1: Schrauben (ISO 3506-1:1997); Deutsche Fassung EN ISO 3506-1:1997. Beuth Verlag, Berlin, 1998-03.
- [6] DIN V 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Beuth Verlag, Berlin, 2007-06.
- [7] prEN ISO 14439: Glas im Bauwesen - Anforderungen für die Verglasung - Verglasungsklötze; Deutsche Fassung prEN 14439:2007, Beuth Verlag, Berlin, 2007-11.
- [8] ETAG 002: Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen – Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme. EOTA, 1998.
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV). Schlussfassung August 2006.
- [10] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassung Z-30.3-6 „Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen“. s.l.: Informationsstelle Edelstahl, 2003.
- [11] Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks: Technische Richtlinie Nr. 3 „Klotzung von Verglasungseinheiten“. 6. Auflage, Verlagsanstalt Handwerk GmbH, Hadamar, 2003.
- [12] Karthage, K.: Verwendbarkeitsnachweise für mechanische Verbindungen bei Fassadenkonstruktionen in Pfosten- und Riegelbauweise mit linienförmig gelagerten Fassadenelementen. DIBT-Mitteilungen 5/2004.

- [13] Euro Inox und The Steel Construction Institute: Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen. Dritte Auflage, Euro Inox und The Steel Construction Institute, 2006.

Bücher und Firmenschriften

- [14] AMS Gesellschaft für angewandte Meß- und Systemtechnik: BEAM Version 3.12. AMS Gesellschaft für angewandte Meß- und Systemtechnik GmbH.
- [15] Buss, Harald: Aktuelles Tabellenhandbuch Feuchte, Wärme, Schall. 2. Auflage, Weka-Verlag, Augsburg, 2002.
- [16] esco Metallbausysteme, Ferro-Wic: Ordner 1.2 „Lagerliste“, Kapitel 2, Stand 10/07. esco Metallbausysteme GmbH.
- [17] esco Metallbausysteme, Ferro-Wic: Ordner 2.2 „Verarbeitungsrichtlinien“, Kapitel 2, Stand 10/07. esco Metallbausysteme GmbH.
- [18] Flachglas Markenkreis: GlasHandbuch 2009. Flachglas Markenkreis GmbH, 2009.
- [19] G+D Computing Pty Ltd: Using Straus7. G+D Computing Pty Ltd, Sydney, 2002.
- [20] G+D Computing Pty Ltd: Straus7 Theoretical Manual. G+D Computing Pty Ltd, Sydney, 2004.
- [21] G+D Computing Pty Ltd: Straus7 Verification Manual. G+D Computing Pty Ltd, Sydney, 2005.
- [22] Gluske BKV: Die Klotzfibel. Gluske BKV GmbH, 2007.
- [23] Hahn, Hans Georg: Technische Mechanik fester Körper. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1990.
- [24] Interpane Glas Industrie AG: Gestalten mit Glas. 7. überarbeitete Auflage, Interpane Glas Industrie AG, 2009.
- [25] Kindmann, R., Frickel, J.: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit. Ernst & Sohn, Berlin, 2002.
- [26] Renckens, J.: Fassaden & Architektur, Faszination in Aluminium und Glas. Herausgeber: FAECF Föderation der Europäischen Fenster und Fassadenhersteller, 1997.
- [27] Saint Gobain Glas: Memento Glashandbuch. Saint Gobain Glas, 2005.
- [28] Otto W. Wetzell (Hrsg.): Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln. 31. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden, 2004.

Zeitschriftenaufsätze, Berichte und Onlinequellen

- [29] Baitinger, M., Busse E., Masur, N.: Nachweiskriterien von mechanischen Verbindungen bei Fassadenkonstruktionen in Pfosten- und Riegelbauweise. Stahlbau 75 (2006), Heft 6, S. 448-453.
- [30] Struck, Werner: Forschungsbericht 58 „Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau“. Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 1979.
- [31] Normen – Stand der Technik – Regeln der Technik – Wissenschaft und Technik. Ingkamm 7-8/04, Beilage zum DIB 7-8/2004.
- [32] <http://www.fassadenbegruenungen.de/FassadenPDF/FassArtenKletterhilfen.pdf>. [Online, Zitat vom 14. Februar 2009]

Anhang

Dieser Arbeit liegt als Anhang eine DVD mit folgendem Inhalt bei:

Ordner	Inhalt
01_Messergebnisse	Enthält die Messergebnisse der Serien A, B und C in tabellarischer Form als PDF-Dateien.
02_Dokumentation Messmittel	Enthält die Dokumentation sämtlicher verwendeter Messmittel (Wegtaster, Kraftaufnehmer), der Hydraulikpumpe sowie Bedienungsanleitung und Funktionsbeschreibung des Programms BEAM.
03_Materialdaten esco	Enthält Werksprüfzeugnisse für Schraubenwerkstoff und Stahlgrundprofil.
04_Dokumentation Straus7	Enthält die Bedienungsanleitung und das Verification Manual für die Software Straus7 in Englisch.
05_Ergebnisse Finite Elemente Untersuchung	Enthält alle Modelle, Ergebnis- und Animationsdateien, welche für diese Arbeit mit dem Programm Straus7 erstellt wurden. Auch alle Bilder (als .JPG), welche zur Ergebnisdokumentation aus Straus7 erstellt wurden, sind enthalten.
06_Dokumentation Versuchsstand	Enthält die Werkstattzeichnungen für den Versuchsstand und die Aufnahmen für Hydraulikzylinder und Stahlschwert. Eine Zeichnung für die Aufnahme der Probekörper wurde ebenfalls beigelegt.
07_Bilder	Enthält Bilder vom Bau des Versuchsstands, der Montage in Rosswein, dem Vorbereiten der Probekörper und der Versuchsdurchführung.
08_Programme	Enthält die Programme St7Viewer zum öffnen der Straus7 Modell-, Ergebnis- und Animationsdateien. Weiterhin ist das Programm Adobe Reader, welches zum Betrachten der PDF-Dateien benötigt wird, enthalten.

Der vollständige Text der Diplomarbeit liegt als PDF bei.

Hinweis zum Öffnen der Straus7 Modelldateien (*.st7)

- 1) Installieren und Starten des ST7Viewers.
- 2) Menüpunkt File (obere Menüleiste) -> Open -> Modelldatei wählen
- 3) Menüpunkt Results (obere Menüleiste) -> Open Results File -> Ergebnisdatei wählen.
- 4) Sichtbarkeitsklassen lassen sich über die Menüleiste am linken Bildrand steuern
- 5) Über Rechtsklick -> Results Settings lassen sich verschiedene Ergebnisse anzeigen
- 6) Über Rechtsklick -> Entity Display kann man die Darstellung von Strichmodell auf ein gefülltes Modell umschalten (im Feld Display Mode). Mit dem Reiter oben kann man zwischen Stab-, Schalen- und Volumenelementen umschalten.
- 7) Über die Taste F12 kann man den Blickwinkel ändern.

Hinweis zum Öffnen der Straus7 Animationsdateien (*.SAF)

- 1) Schritte 1 bis 3 wie oben.
- 2) Menüpunkt Results (obere Menüleiste) -> Open Results File -> Ergebnisdatei wählen
- 3) Menüpunkt Results (obere Menüleiste) -> Play Animations File -> Animation wählen
- 4) Alternativ: Doppelklick auf *.SAF- Datei.
- 5) Alternativ: SAF Player starten (mit ST7Viewer installiert) und Datei wählen.

Allgemeiner Hinweis:

Über die Leiste auf der linken Seite und über Rechtsklick -> Groups kann man Sichtbarkeitsklassen Ein- und Ausblenden.